DOI: 10.20103/j.stxb.202208152346

张穗粒,盛茂银,王霖娇,何娴娴,罗娜娜.西南喀斯特长期植被修复对土壤有机碳组分的影响.生态学报,2023,43(20):8476-8492. Zhang S L, Sheng M Y, Wang L J, He X X, Luo N N.Effects of long term vegetation restorations on soil organic carbon fractions in the karst rocky desertification ecosystem, Southwest China.Acta Ecologica Sinica,2023,43(20):8476-8492.

西南喀斯特长期植被修复对土壤有机碳组分的影响

张穗粒^{1,2},盛茂银^{1,3,*},王霖娇^{1,2},何娴娴^{1,3},罗娜娜^{1,3}

1贵州师范大学喀斯特研究院,贵阳 550001

2国家喀斯特石漠化治理工程技术研究中心,贵阳 550001

3 贵州省喀斯特石漠化防治与衍生产业工程实验室,贵阳 550001

摘要:揭示西南喀斯特土壤有机碳分布积累及其组分构成对长期植被修复的响应规律和内在机理,可为喀斯特石漠化科学治理 和阐明喀斯特植被修复的土壤碳汇效应提供科学依据。以西南典型喀斯特石漠化植被恢复区实施了 28—31 年的 4 种植被修 复工程内的 7 种典型修复措施(人造乔木林:柏木和柚木种植;人造灌木林:花椒和火龙果种植;人造藤林:金银花种植;人工草 地:砂仁和皇竹草种植)为研究对象,系统分析了土壤总有机碳、活性有机碳、缓效性有机碳和惰性有机碳分布积累对长期植被 修复的响应。结果表明:(1)西南喀斯特长期植被修复显著改变了土壤有机碳及其组分的分布积累。人造乔木和藤本显著提 升土壤有机碳及其各组分的分布积累,但人工种草不仅不能提高土壤有机碳的累积,反而在多数情况下降低了土壤总有机碳含 量和储量以及土壤有机碳各组分含量。(2)西南喀斯特长期植被修复明显影响着土壤有机碳库组分结构。除人工种草外,植 被修复显著提升了土壤有机碳库中缓效性有机碳的占比。人造花椒明显降低了土壤有机碳库中活性有机碳的占比。柏木种植 显著增加了土壤有机碳碳库中的惰性有机碳的比例,而火龙果和砂仁种植明显降低了土壤有机碳碳库中的惰性有机碳的比例。 (3)土壤总氮、总磷和容重与土壤有机碳及其各组分的分布积累具有极显著正/负相关,是长期植被修复背景下西南喀斯特土 壤有机碳及其组分分布积累的主要影响因子。研究结果为西南喀斯特脆弱生态系统科学植被恢复,以及基于植被修复的土壤 碳循环调控助力碳中和提供了科学理论依据。

关键词:喀斯特;石漠化治理;植被修复;土壤有机碳;组分

Effects of long term vegetation restorations on soil organic carbon fractions in the karst rocky desertification ecosystem, Southwest China

ZHANG Suili^{1,2}, SHENG Maoyin^{1,3,*}, WANG Linjiao^{1,2}, HE Xianxian^{1,3}, LUO Nana^{1,3}

1 Institute of Karst Research, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

2 National Engineering Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guiyang 550001, China

3 Guizhou Engineering Laboratory for Karst Rocky Desertification Control and Derivative Industry, Guiyang 550001, China

Abstract: The response patterns and intrinsic mechanisms controlling the distribution and accumulation of soil organic carbon and its fractions were determined under long term vegetation restoration in the southwest karst area of China. This paper aims to provide a scientific basis for the scientific management of rocky desertification in karst areas and the clarification of soil carbon sink effects during karst vegetation restoration. Seven typical restoration measures implemented in four vegetation restoration projects (Tree forest construction: *Cupressus funebris* and *Tectona grandis* planting; Shrub forest constructions: *Zanthoxylum bungeanum* and *Hylocereus undatus* planting; Vine forest construction: *Lonicera japonica* planting; Grassland constructions: *Pennisetum sinese* and *Amomum villosum* planting), all carried out for 28–31 years,

基金项目:国家自然科学基金项目(42107250);贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2020]12012)

收稿日期:2022-08-15; 采用日期:2023-06-28

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shmoy@163.com

were investigated in a typical karst rocky desertification area in the southwest China. The distribution and accumulation of soil total organic carbon (SOC), active organic carbon (AOC), slow-active organic carbon (SAC), and inert organic carbon (IOC) under long term vegetation restoration were systematically analyzed. Three main results were obtained. (1) The long term vegetation restoration in the region significantly changed the distribution and accumulation of SOC and its fractions. The construction of artificial tree and vine forests significantly improved the distribution and accumulation of SOC and its fractions. The construction of an artificial grassland not only failed to increase the accumulation of SOC, but in most cases reduced the content and storage of SOC and the content of some SOC fractions. (2) Long-term vegetation restoration in the karst region clearly affected the structure of the fractions of SOC pool. In addition to artificial grassland construction, vegetation restoration significantly increased the proportion of SAC in the SOC pool. Artificial planting of Zanthoxylum bungeanum significantly reduced the proportion of AOC in the SOC pool. Planting Cupressus funebris significantly increased the proportion of IOC in the SOC pool, while planting Hylocereus undatus and Amomum villosum significantly decreased the proportion of IOC in the SOC pool. (3) Soil total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and bulk density (BD) had extremely significantly positive/negative correlations with the distribution and accumulation of SOC and its fractions, and were the main factors influencing the distribution and accumulation of SOC and its fractions in the study area under longterm vegetation restoration. The results provided a theoretical basis for the science-based vegetation restoration of the fragile ecosystem of the southwest karst area of China, enabling the regulation of the soil carbon cycle based on vegetation restoration to achieve carbon neutrality.

Key Words: karst; rocky desertification control; vegetation restoration; soil organic carbon; fraction

土壤碳库是全球碳库中最活跃的部分,对维持全球碳平衡具有不可忽视的贡献。土壤有机碳作为土壤碳 库的重要组成部分,不仅是表征土壤质量的重要指标^[1],还显著影响生态系统碳循环的平衡^[2]。土壤有机碳 (SOC)根据其分解速率和稳定性的差异可划分为活性有机碳(AOC)、缓效性有机碳(SAC)和惰性有机碳 (IOC)^[3]。土壤活性有机碳具有移动较快、稳定性较差、易被氧化和分解等特点^[4],通常用可溶性有机碳 (DOC)、易氧化有机碳(EOC)和微生物生物量碳(MBC)来对其进行表征^[5-6]。土壤缓效性有机碳是土壤中 相对稳定、不易分解但仍比惰性有机碳更容易利用的有机碳,其具有中等周转率,主要包括轻组有机碳 (LFOC)和颗粒有机碳(POC)^[7]。而土壤惰性有机碳因其高度的稳定性和较长的周转时间,常作为土壤对环 境长期变化的响应指标^[8]。此外,土壤有机碳各组分间能够相互转化,共同对土壤碳循环过程进行调控。因 此,厘清土壤活性、缓效性和惰性有机碳组分分布积累和迁移变化的规律和内在机制,对于准确评估土壤碳储 量及碳库动态变化具有重要意义。

植被修复是提升退化生态系统土壤有机碳固持的有效措施^[9]。然而,由于不同植被修复措施在种植环境、物种种类、地上生物量以及凋落物产生量等方面存在显著差异,因此不同修复措施对土壤有机碳碳库的影响明显不同^[10-11]。赵元等^[12]研究发现植被恢复显著提升了桂西北喀斯特峰丛洼地的土壤有机碳和活性碳库;李文杰等^[13]指出随着人工刺槐林植被恢复,黄土高原土壤有机碳含量显著累积,而活性有机碳无明显变化;而苏静等^[14]对比黄土丘陵区农田、草地、柠条、沙棘及山杏 5 种植被恢复措施发现,草地恢复虽增加了土壤有机碳含量,但土壤活性有机碳含量却有所减少。可见,尽管针对植被恢复的土壤有机碳分布积累研究报道为数众多,但该领域的研究仍存在以下明显问题:(1)现有研究大多针对相同植被恢复类型(乔、灌、藤、草)内的比较研究^[15-17],系统比较乔木-灌木-藤本-草本不同植被恢复类型间的研究极为缺乏^[18]。(2)现有研究主要瞄准土壤总有机碳库和活性有机碳库,而对于土壤缓效性和惰性有机碳库的研究明显薄弱^[19],导致土壤缓效性与惰性有机碳库对植被修复的响应规律及其对整个土壤有机碳库稳定与周转的内在驱动等关键科学问题缺乏认识,也是导致当前该领域的研究未能达到一致结论的重要原因。因此,系统研究土壤有机碳库的影

响及其驱动机制,对于人为调控土壤碳循环应对全球变化具有重要意义,对于当前大力开展植被修复的西南 脆弱喀斯特生态系统尤为重要和迫切。

中国西南喀斯特系全球三大碳酸盐岩集中连片分布区之一,其生态系统高度敏感和脆弱^[2],加之该区人 口密度大、人类活动强烈,导致该区植被毁坏和土壤流失严重^[20],引发的生态系统退化(石漠化)已成为制约 该区社会经济可持续发展的严重生态问题。石漠化治理已成为国家和地方各级政府重要任务,自 20 世纪 90 年代开始,该区就实施了大量生态保护与建设工作,以促进植被恢复^[12]、治理石漠化。大量植被修复措施的 实施势必对土壤有机碳库产生影响。尽管当前该区植被恢复对土壤有机碳积累^[21]、活性有机碳组分含 量^[22]、碳库管理指数变化^[11]等方面影响的研究陆续见诸报道,但对于土壤缓效性和惰性有机碳库明显缺乏 研究,导致该区石漠化植被恢复对土壤有机碳分布积累和迁移转化规律及其内在驱动机制仍缺乏清晰认识, 限制了西南喀斯特基于植被恢复的土壤碳调控及其在国家碳中和战略中的作用发挥。因此,本研究选取西南 典型喀斯特石漠化治理区——贵州关岭花江为研究区,以实施 30 年左右的人造乔木林(柏木和柚木种植)、人造 灌木林(花椒和火龙果种植)、人造藤林(金银花种植)以及人工草地(砂仁和皇竹草种植)为研究对象,选取具有 相似自然地理背景且无植被修复措施的裸地为对照,研究植被修复措施对土壤有机碳及其活性、缓效性和惰性 组分分布积累的影响,以及活性、缓效性和惰性有机碳组分在土壤总有机碳中的占比对植被修复的响应,探究影 响土壤有机碳分布积累的关键环境因子和植被修复影响土壤有机碳库的内在驱动机制,以期为西南喀斯特脆弱 生态系统科学植被恢复、以及基于植被修复的土壤碳循环调控助力碳中和提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市关岭县北盘江花江河段峡谷两岸(25°38'19"—25°41'32"N, 105°38'31"— 106°40'51"E)(图1)。该区系典型的喀斯特高原峡谷地貌,海拔450—1450 m,最大相对高差超1000 m。年平 均降水量约1100 mm,主要分布在5—10月,占年总降水量的83%。岩石主要由三叠系的石灰岩、泥质石灰岩 和页岩组成。土壤主要由黄壤和黄色石灰土组成。植被为亚热带常绿落叶阔叶混交林,以次生林为主。天然 植被主要由藤本、荆棘和灌木组成,如窄叶火棘(Pyracantha angustifolia)、缫丝花(Rosa roxburghii)和山莓 (Rubus corchorifolius),局部分布木麻黄(Casuarina equisetifolia)、马尾松(Pinus massoniana)和亮叶桦(Betula luminifera)。该区由于人口众多、人为活动强烈,存在严重的喀斯特石漠化现象。自20世纪90年代开始,该



图 1 研究区位置图 Fig.1 Location of study area

区开展了大量的生态修复工程。最早的一批植被修复措施的实施,距今已有 30 余年。

1.2 样地建立和样品采集

于 2021 年 3 月中旬在研究区选取具有代表性的 4 种植被修复工程的 7 种典型修复措施(人造乔木林:柚木和柏木种植,人造灌木林:花椒和火龙果种植,人造藤林:金银花种植,人工种草:皇竹草和砂仁种植)为研究对象。在尽量保证土壤质地、理化性质、海拔、坡度、坡向等自然地理背景条件一致的前提下,针对上述 7 种植被修复措施,分别建立样地(表 1)。同时,选取相同背景条件无植被修复措施实施的裸地建立对照样地。每种类型样地面积为 100 m×100 m,在样地内,随机设置 3 个面积为 10 m×10 m 的样方。每个样方内按 S 型布点法随机选取 5 个采样点。采样时,先将土壤表面枯枝落叶去除,每个采样点按 0—5 cm、5—10 cm、10—15 cm 三个土层进行土壤样品采集,分土层将各采样点的土壤均匀混合制成一个土样。同时取环刀土用于测定土壤容重。将采集的土壤样品带回实验室后,去除砾石和动植物残体,分为 2 部分,一部分土样置于 4℃冰箱用于土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳测定,另一部分土样于室外自然风干后过筛,测定其它相关指标。

土壤突重至田环刀注测完 土壤

土壤容重采用环刀法测定,土壤 pH 值采用 2.5:1 水土比电位计法测定。土壤总有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。土壤全氮采用硒粉-硫酸铜-硫酸钾-硫酸消煮、凯氏定氮仪测定。土壤全磷采用硫酸-高氯酸消煮、钼锑抗比色法测定。以上土壤理化性质测定方法具体步骤参见鲁如坤研究^[23],各样地具体土壤理化性质如表 2 所示。

1.4 土壤有机碳组分含量测定

惰性有机碳采用酸水解法直接测定^[24]。缓效性有机碳组分用颗粒有机碳和轻组有机碳指征。颗粒有机 碳采用六偏磷酸钠分散法测定^[9],颗粒有机碳含量(g/kg)=颗粒态土壤中有机碳含量×颗粒态土壤占全土的 质量分数。轻组有机碳采用 Nal 密度分离法测定^[25],土壤轻组有机碳含量(g/kg)=轻组土壤中有机碳含量× 轻组土壤占全土的质量分数。活性有机碳组分用易氧化有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳指征。易氧化有 机碳测定采用 KMnO₄氧化法测定^[26]。可溶性有机碳采用无二氧化碳水浸提法提取^[27]、Analyzer Multi N/ C3100(Analytik Jena,德国)测定。微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法测定^[28]。

1.5 数据分析

土壤剖面总有机碳储量按下述公式计算[29]:

$SOCS = C \times BD \times E \times (1-G) / 100$

式中,SOCS 为土壤有机碳储量(kg/m²), *C* 为土壤有机碳含量(g/kg), *BD* 为土壤容重(g/cm³), *E* 为土层厚度(cm), *G* 为直径大于 2 mm 的石砾在土壤中的重量占比(%)。

使用 SPSS 26.0 和 Excel 软件进行数据统计分析,用 Origin 2021 软件绘图。通过单因素方差分析和 Duncan 检验对变量间差异的显著性进行检验。Pearson 法用于分析变量之间的相关性。冗余分析由 Canoco 5.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同植被修复的土壤总有机碳含量和储量

4种植被修复工程及对照样地的土壤总有机碳含量和储量范围分别为 7.86—42.81 g/kg 和 0.57—1.92 kg/m²(图 2)。4种植被修复工程中,人工种草 3 个土层的土壤总有机碳含量显著低于对照样地(P<0.05),而 人造乔木和藤本显著高于对照样地(P<0.05),人造灌木与对照样地无显著差异(P>0.05)。与土壤总有机碳 含量不同,人造乔木、灌木和藤本的土壤总有机碳储量在 3 个土层均显著高于对照样地(P<0.05);人工种草的土壤总有机碳储量在 0—10 cm 2 个土层与对照样地无显著差异(P>0.05),但在 10—15 cm 土层显著低于 对照样地(P<0.05)。

		Table 1 Ba	isic information of	the sample pl	ots				
植	技修 复	样地中心	点坐标	长在方面					植被平均
Vegetation	a restoration	Center coordi	inate of plot	恢灵 ^中 限	海拔	土壤类型	坡向	坡度	覆盖度
工程类型	种植措施	经度	纬度	necovery vears/a	Altitude/m	Soil types	Aspect	$Slope/(^{\circ})$	Average of
Project type	Planting measures	Longitude	Latitude						vegetation cover/%
建植乔木 Tree forest construction	柏木种植 <i>Cupressus funebris</i> planting	105°39′11.0″	25°39'25.4"	30	765—778	黄壤	圉	25—36	71.63
	柚木种植 Tectona grandis planting	105°39'46.4″	25°39'38.7″	31	745—751	黄壤	东南	24—34	72.35
建植灌木 Shrub forest construction	花椒种植 Zanthoxylum bungeanum planting	105°40'05.6″	25°39'17.8"	29	735—748	黄壤	东南	26—36	69.65
	火龙果种植 Hylocereus undatus planting	105°39'26.0″	25°39'42.1″	28	763—778	黄壤	撖	24—35	68.69
建植藤本 Vine forest construction	金银花种植 <i>Lonicera japonica</i> planting	105°38'12.7"	25°40′15.3″	28	739—748	黄壤	东南	25—34	71.32
建植草本 Grassland construction	皇竹草种植 Pennisetum sinese planting	105°38'08.3″	25°40'59.0″	30	761775	黄壤	撖	23—35	69.36
	砂仁种植 Amomum villosum planting	105°38'47.1"	25°40'05.9″	31	758—769	黄壤	东南	26—36	70.03
对照样地(无植被覆盖) Control check (without vegetation restoration)	对照样地(无植被覆盖) Control check (without vegetation restoration)	105°40'42.0″	25°39'18.6″	I	732—743	黄壤	东南	25—35	8.05

表1 样地基本信息

	notionotion
的土壤理化性质	foront vocatation
复和对照样地的	anoutine of diff
不同植被修	an looimodo b
表 2	and locious a
	500

样地	타석								
			公击		人信	水く			
Symbols	of plot	土层深度	谷里 Bull domeitu/	п	王炎 Tatal attractor /	王 Totol - hoosehoose /	碳氮比	碳磷比	氮磷比
工程类型 Project types	种植措施 Planting measures	Soil depth/cm	(g/cm^3)	пq	10tal nurogen/ (g/kg)	10tal prosprorus/ (g/kg)	C/N ratio	C/P ratio	N/P ratio
T	Tcf	05	$0.94\pm0.20aD$	$7.56\pm0.09aAB$	2.22±0.55aAB	1.11 ± 0.23 aBC	$20.78 \pm 2.88 aA$	41.45±4.17aC	$2.00\pm0.08\text{bD}$
		5 - 10	$1.11\pm0.09aB$	$7.60\pm0.16aBC$	1.65±0.43aA	$0.87{\pm}0.18{\rm abB}$	$20.55 \pm 2.93 aA$	38.64±3.55aC	1.89 ± 0.09 bD
		1015	$1.20{\pm}0.07\mathrm{aB}$	$7.69\pm0.14aAB$	1.56±0.39aAB	$0.68\pm0.14\text{bBC}$	$19.84{\pm}3.20{\rm aAB}$	45.22±5.41 aC	2.29±0.09aC
	Ttg	0—5	0.97 ± 0.07 hD	$7.46\pm0.12aAB$	$2.21\pm0.62aAB$	$0.73\pm0.16aCD$	$17.79 \pm 3.24 aAB$	$52.51 \pm 5.50 aB$	$2.98\pm0.22aB$
		5 - 10	1.13±0.16abB	7.33±0.08aCD	$1.55 \pm 0.40 aA$	$0.51 \pm 0.11 aC$	$19.20\pm2.98aAB$	57.26±5.83aB	$3.00\pm0.15aB$
		10-15	1.25±0.16aB	7.31±0.24aC	1.28±0.31aB	$0.49\pm0.10aCD$	$20.81\pm2.96\mathrm{aA}$	53.70±5.86aB	$2.59\pm0.09\mathrm{bB}$
S	Szb	05	0.99 ± 0.02 bCD	$6.95 \pm 0.21 a CD$	$2.17\pm0.55aAB$	$1.83 \pm 0.39 aA$	$14.17 \pm 2.01 aB$	$16.70\pm1.60\mathrm{bF}$	$1.18\pm0.05 cF$
		5 - 10	$1.07\pm0.06abB$	$7.00\pm0.15aE$	$2.05\pm0.52aA$	1.34 ± 0.28 abA	$15.06 \pm 2.23 aBC$	22.79±2.33aD	$1.52 \pm 0.07 bE$
		1015	$1.17 \pm 0.07 aB$	7.09±0.02aC	$1.98\pm0.50aA$	$1.06 \pm 0.22 \text{bA}$	$14.02 \pm 2.02 a CD$	26.03±2.61aDE	$1.86 \pm 0.08 aD$
	Shu	0—5	1.26±0.13aB	$7.75 \pm 0.19 aA$	$2.05\pm0.54aAB$	$0.53 \pm 0.11 aD$	$15.96 \pm 2.52 aB$	$60.48 \pm 6.07 aA$	$3.81\pm0.21\mathrm{bA}$
		5 - 10	$1.43 \pm 0.20 aA$	$7.87{\pm}0.11{\rm aAB}$	$1.84\pm0.46aA$	0.39 ± 0.08 abC	14.45±2.13aC	66.75±7.00aA	$4.64 \pm 0.19 aA$
		1015	$1.50\pm0.23aA$	$7.88{\pm}0.10{\rm aA}$	$1.48\pm0.37aAB$	$0.34 \pm 0.07 \text{bD}$	$15.18\pm 2.16aCD$	$65.11 \pm 6.48 aA$	$4.31{\pm}0.18{\rm aA}$
Λ	VIj	0—5	$0.92\pm0.15aDE$	$7.28\pm0.44\mathrm{aBC}$	2.57±0.66aA	$1.34\pm0.28aB$	$17.10\pm2.66aAB$	$32.42 \pm 3.41 aD$	$1.91\pm0.09aD$
		5—10	$1.01 \pm 0.12 aB$	$7.34\pm0.24aCD$	2.19±0.56aA	$1.13\pm0.24aAB$	$17.56\pm 2.63aABC$	33.70±3.48aC	$1.93 \pm 0.09 aD$
		1015	$1.12 \pm 0.11 aB$	7.39 ± 0.22 aBC	$1.62\pm0.41aAB$	$0.86\pm0.18aAB$	$20.72 \pm 3.02 aA$	38.91±3.98aC	$1.89\pm0.08aD$
G	G_{ps}	05	1.52 ± 0.05 bA	$7.85\pm0.16\mathrm{aA}$	0.76±0.18aC	$0.47 \pm 0.10 aD$	$15.45 \pm 1.81 \mathrm{aB}$	24.96±2.31aE	$1.62 \pm 0.04 aE$
		5 - 10	1.59 ± 0.04 bA	$7.96\pm0.19aA$	$0.70\pm0.16aB$	$0.44 \pm 0.09 aC$	$13.11 \pm 1.46 abC$	21.00±2.13abD	$1.60 \pm 0.02 aE$
		1015	$1.69\pm0.02aA$	$7.91\pm0.16aA$	0.56±0.13aC	$0.34 \pm 0.07 aD$	$11.62 \pm 1.28 \text{bD}$	19.14±1.83bE	$1.65 \pm 0.03 \mathrm{aE}$
	Gav	05	1.16 ± 0.04 bBC	7.18 ± 0.24 aBC	1.04±0.25aC	$0.39 \pm 0.08 aD$	$16.55 \pm 2.06 aAB$	43.44±3.86aC	$2.63 \pm 0.09 aC$
		5 - 10	1.39±0.17abA	7.17 ± 0.29 aDE	$0.75\pm0.18abB$	$0.32 \pm 0.07 aC$	$17.60\pm2.21\mathrm{aABC}$	40.70±4.03aC	$2.32 \pm 0.06 bC$
		1015	$1.49\pm0.15aA$	7.16±0.40aC	$0.61\pm0.14\mathrm{bC}$	$0.30 \pm 0.06 aD$	$15.57\pm1.83\mathrm{aBCD}$	$31.01 \pm 3.19 \text{bD}$	$1.99 \pm 0.03 cD$
CK	CK	0—5	$0.74\pm0.04bE$	$6.62\pm0.08\mathrm{aD}$	1.58±0.37aBC	$1.20 \pm 0.25 aB$	$16.80\pm1.72aAB$	22.04±1.78aEF	$1.31\pm0.03\mathrm{aF}$
		5 - 10	$0.95\pm0.07aB$	$6.65\pm0.11\mathrm{aF}$	$1.42\pm0.32aAB$	$1.07\pm0.23aAB$	16.69±1.74aABC	22.22±2.09aD	$1.33\pm0.02\mathrm{aF}$
		10-15	$1.05 \pm 0.07 aB$	$6.59 \pm 0.13 aD$	$1.23\pm0.28aB$	$0.91 \pm 0.19 aAB$	$17.81 \pm 1.68 \mathrm{aABC}$	23.93±1.96aDE	$1.35\pm0.02\mathrm{aF}$

http://www.ecologica.cn

8481

planting; Gav: 砂仁种植 Amomum villosum planting; CK: 对照样地(无植被覆盖) Control check (without vegetation restoration); 小写字母表示同一植被修复措施不同土层间的差异, 大写字母表示同一土层 不同植被修复措施间的差异 (P<0.05)

43 卷





Fig.2 Soil total organic carbon contents and storages of the four vegetation restoration projects and CK

T:建植乔木;S:建植灌木;V:建植藤本;G:建植草本;CK:对照样地(无植被覆盖);小写字母表示同一植被修复工程不同土层间的差异,大写字母表示同一土层不同植被修复工程间的差异(P<0.05)

7种植被修复措施及对照样地的土壤总有机碳含量和储量范围分别为 6.44—45.17 g/kg 和 0.48—1.92 kg/m²(图 3)。在所有 3个土层,皇竹草和砂仁种植的土壤总有机碳含量显著低于对照样地(P<0.05),而金 银花和柏木种植显著高于对照样地(P<0.05),火龙果种植与对照样地无显著差异(P>0.05);柚木、花椒和火 龙果种植在多数土层虽无显著差异,但均显著高于砂仁和皇竹草种植(P<0.05)。至于土壤总有机碳储量,柏



Fig.3 Soil total organic carbon contents and storages of the seven vegetation restoration measures and CK

Tef: 柏木种植; Tug: 柚木种植; Szb: 花椒种植; Shu: 火龙果种植; Vlj: 金银花种植; Gps: 皇竹草种植; Gav: 砂仁种植; 小写字母表示同 一 植被修复措施不同土层间差异, 大写字母表示同一土层不同植被修复措施间的差异(P<0.05)

木、柚木、花椒、火龙果和金银花种植在所有3个土层均显著高于对照样地(P<0.05),而皇竹草种植在0—5 cm 土层与对照样地无显著差异(P>0.05),砂仁种植在0—10 cm 2个土层与对照样地无显著差异(P>0.05)。 垂直剖面上,植被修复措施的土壤总有机碳含量和储量大多表现出随土层深度增加而下降的趋势,而对照样地仅在土壤总有机碳含量上遵循这一规律。

2.2 不同植被修复的土壤活性有机碳组分含量

4种植被修复工程及对照样地的土壤活性有机碳含量(EOC、DOC 和 MBC 含量之和)范围为 1.64—9.42 g/kg(图4)。在所有 3 个土层,人工种草土壤 EOC 显著低于对照样地(P<0.05),人造藤本土壤 EOC 显著高 于对照样地(P<0.05),而人造乔木土壤 EOC 仅在 0—5 cm 土层显著高于对照样地(P<0.05),人造灌木土壤 EOC 在所有土层与对照样地无显著差异(P>0.05)。与土壤 EOC 不同,人造乔木和草本的土壤 DOC 在 0—15 cm 3 个土层均显著高于对照样地(P<0.05),而人造灌木和藤本的土壤 DOC 含量在 5—15 cm 2 个土层与对照 样地无显著差异(P>0.05)。结果还显示,在所有 3 个土层,人造藤本的土壤 MBC 显著高于对照样地(P< 0.05),而人造灌木和草本的土壤 MBC 与对照样地无显著差异(P>0.05),人造乔木的土壤 MBC 仅在 0— 10 cm土层显著高于对照样地(P<0.05)。

Fig.4 Soil organic carbon fraction contents of the four vegetation restoration projects and CK

7种植被修复措施及对照样地土壤活性有机碳含量范围为 1.42—10.41 g/kg(图 5)。在所有 3 个土层, 皇竹草和砂仁种植的土壤 EOC 显著低于对照样地(P<0.05),而柏木和金银花种植的土壤 EOC 显著高于对照 样地(P<0.05),花椒和火龙果种植的土壤 EOC 与对照样地无显著差异(P>0.05),柚木种植的土壤 EOC 仅在 0—5 cm 土层显著高于对照样地(P<0.05)。就土壤 DOC 含量而言,柏木、柚木、火龙果、皇竹草和砂仁种植的 土壤 DOC 在所有 3 土层显著高于对照样地(P<0.05),而花椒种植在所有 3 个土层与对照样地无显著差异 (P>0.05),金银花种植的土壤 DOC 仅在 0—5 cm 土层显著高于对照样地(P<0.05)。与 EOC 和 DOC 含量表 现不同,在所有 3 个土层,柏木和金银花种植的土壤 MBC 显著高于对照样地(P<0.05),而柚木、花椒,砂仁种 植的土壤 MBC 与对照样地无显著差异(P>0.05);火龙果种植的土壤 MBC 仅在 0—5 cm 土层显著高于对照样 地(P<0.05)。在垂直剖面上,7 种植被修复措施及对照样地的土壤 EOC、DOC 和 MBC 含量均呈现随土层深 度增加而降低的趋势。

2.3 不同植被修复的土壤缓效性有机碳组分含量

4种植被修复工程及对照样地的土壤缓效性有机碳含量(POC 和 LFOC 含量之和)范围为 2.02—18.00 g/kg(图 4)。在所有 3 个土层中,人工种草的土壤 POC 显著低于对照样地(P<0.05),而人造乔木、灌木和藤本的土壤 POC 显著低于人造乔木和藤本(P<0.05)。人造乔木、灌木和藤本的土壤 LFOC 在所有 3 个土层同样显著高于对照样地(P<0.05),但人造灌木的土壤 LFOC 与对照样地也无显著差异(P>0.05)。

7种植被修复措施及对照样地的土壤缓效性有机碳含量范围为 1.54—19.58 g/kg(图 5)。在所有 3 个土 层,皇竹草和砂仁种植的土壤 POC 显著低于对照样地(P<0.05),而柏木、柚木和金银花种植的土壤 POC 显著高于对照样地(P<0.05)。就土壤 LFOC 含量而言,柏木、柚木、花椒、火龙果和金银花种植在所有 3 个土层均显著高于对照样地(P<0.05),而皇竹草和砂仁种植与对照样地无显著差异(P>0.05),花椒种植仅在 10—15 cm 土层显著高于火龙果和金银花种植(P<0.05)。在剖面垂直分布上,7 种植被修复措施及对照样地的土壤 POC 和 LFOC 含量均呈现随土层增加而降低的趋势。

Fig.5 Soil organic carbon fraction contents of the seven vegetation restoration measures and CK

2.4 不同植被修复的土壤惰性有机碳组分含量

4 种植被修复工程及对照样地的土壤惰性有机碳含量范围为4.28—23.83 g/kg(图4)。在所有3个土层, 人工种草的土壤惰性有机碳含量显著低于对照样地(P<0.05),而人造乔木和藤本的土壤惰性有机碳含量显 著高于对照样地(P<0.05),人造灌木的土壤惰性有机碳含量与对照样地无显著差异(P>0.05)。

7种植被修复措施及对照样地土壤惰性有机碳含量范围为4.24—26.21 g/kg(图5)。在所有3个土层,皇 竹草和砂仁种植的土壤惰性有机碳含量显著低于对照样地(P<0.05),而柏木、柚木和金银花种植的土壤惰性 有机碳含量显著高于对照样地(P<0.05),火龙果种植土壤惰性有机碳含量与对照样地无显著差异(P>0.05)。 垂直剖面上,7种植被修复措施及对照样地的惰性有机碳含量均呈现随土层增加而降低趋势。

2.5 不同植被修复的土壤有机碳库组分占比

4种植被修复工程及对照样地的土壤 AOC/SOC(EOC/SOC、DOC/SOC 和 MBC/SOC 之和)范围为 18.51%—20.99%, SAC/SOC 范围为 24.27%—38.26%, IOC/SOC(POC/SOC 与 LFOC/SOC 之和)范围为 46.57%—56.83%(图 6)。总体而言,喀斯特土壤有机碳库中, IOC 占比最高, SAC 次之, AOC 最低。4 种植被

图 6 不同植被修复和对照样地的土壤有机碳库组分占比

AOC/SOC: 活性有机碳与土壤总有机碳的比值 Ratio of active organic carbon to soil total organic carbon; SAC/SOC: 缓效性有机碳与土壤总 有机碳的比值 Ratio of slow-active organic carbon to soil total organic carbon; IOC/SOC 惰性有机碳与土壤总有机碳的比值 Ratio of inert organic carbon to soil total organic carbon; 大写字母表示不同植被修复土壤有机碳库组分占比的差异 (*P*<0.05)

修复工程中,人造灌木的土壤 AOC/SOC 显著低于对照样地(P<0.05),而人造乔木、藤本和草本与对照样地间的土壤 AOC/SOC 无显著差异(P>0.05)。与土壤 AOC/SOC 不同,人造乔木、灌木和藤本的土壤 SAC/SOC 均显著高于对照样地(P<0.05),其中人造乔木的土壤 SAC/SOC 最大,而人工种草的土壤 SAC/SOC 与对照样地 无显著差异(P>0.05)。此外,人造乔木的土壤 IOC/SOC 显著高于对照样地(P<0.05),而人工种草和灌木的 土壤 IOC/SOC 显著低于对照样地(P<0.05),人造藤本的土壤 IOC/SOC 与对照样地无显著差异(P>0.05)。 4 种植被修复工程间的土壤 AOC/SOC 无显著差异,而土壤 SAC/SOC 和 IOC/SOC 均存在显著差异。

7种植被修复措施及对照地土壤 AOC/SOC 比例范围为 17.75%—21.09%,土壤 SAC/SOC 比例范围为 24.27%—39.98%,土壤 IOC/SOC 比例范围为 39.14%—57.12%(图 6)。在 7种植被修复措施中,花椒的土壤 AOC/SOC 显著低于对照样地(P<0.05),而其余的植被修复措施的土壤 AOC/SOC 与对照样地无显著差异 (P>0.05)。柏木、柚木、火龙果、花椒和金银花种植的土壤 SAC/SOC 显著高于对照样地(P<0.05),而砂仁和 皇竹草种植的土壤 SAC/SOC 与对照样地无显著差异(P>0.05)。此外,柏木种植的土壤 IOC/SOC 显著高于 对照样地(P<0.05),而砂仁和火龙果种植的土壤 IOC/SOC 显著低于对照样地(P<0.05),柚木、皇竹草、花椒 和金银花种植的土壤 IOC/SOC 均与对照样地无显著差异(P>0.05)。7种植被修复措施间的土壤 AOC/SOC 无显著差异,而土壤 SAC/SOC 和 IOC/SOC 均存在显著差异。

2.6 土壤有机碳及其各组分含量与土壤理化因子间的关系

土壤有机碳及其各组分含量与土壤理化因子之间的 Pearson 相关性见表 3。土壤总有机碳含量与缓效性 有机碳、惰性有机碳、活性有机碳(微生物生物量碳和易氧化有机碳)含量呈极显著正相关(P<0.01),与可溶 性有机碳含量呈显著正相关(P<0.05)。土壤活性、缓效性和惰性有机碳含量两两间呈极显著正相关(P< 0.01)。土壤总有机碳含量和储量及其各组分含量(除可溶性有机碳外)与土壤容重呈极显著负相关(P< 0.01),与土壤总氮和总磷呈极显著正相关(P<0.01)。土壤可溶性有机碳含量仅与土壤 pH 呈极显著正相关 (P<0.01)。土壤惰性有机碳和易氧化有机碳含量与土壤碳氮比(C/N)呈极显著正相关(P<0.01),土壤总有 机碳含量和储量以及缓效性有机碳含量与土壤 C/N 呈显著正相关(P<0.05)。土壤总有机碳储量、轻组有机 碳和可溶性有机碳含量与土壤碳磷比(C/P)和氮磷比(N/P)呈极显著正相关(P<0.01),土壤微生物生物量 碳含量与土壤 C/P 和 N/P 呈显著正相关(P<0.05)。

	BD	$_{\rm pH}$	TN	TP	C/N	C/P	N/P	MBC	DOC	EOC	LFOC	POC	IOC
SOC	-0.711 **	-0.132	0.902 **	0.638 **	0.287 *	0.214	0.116	0.750 **	0.288 *	0.960 **	0.830 **	0.903 **	0.959 **
IOC	-0.707 **	-0.139	0.833 **	0.667 **	0.319 **	0.094	-0.045	0.665 **	0.359 **	0.945 **	0.835 **	0.896 **	
POC	-0.611 **	-0.020	0.804 **	0.601 **	0.262 *	0.172	0.072	0.770 **	0.423 **	0.911 **	0.850 **		
LFOC	-0.449 **	0.142	0.726 **	0.342 **	0.264 *	0.409 **	0.313 **	0.648 **	0.648 **	0.802 **			
EOC	-0.711 **	-0.144	0.817 **	0.605 **	0.344 **	0.185	0.051	0.736 **	0.353 **				
DOC	0.044	0.424 **	0.154	-0.215	0.196	0.394 **	0.309 **	0.427 **					
MBC	-0.485 **	0.078	0.702 **	0.386 **	0.124	0.269 *	0.265 *						
SOCS	-0.365 **	0.080	0.804 **	0.392 **	0.273 *	0.469 **	0.400 **						

表 3 土壤有机碳及其各组分含量与土壤理化性质的相关性 Table 3 Correlations between the content of SOC and its fractions with soil physical and chemical properties

*:表示在 0.05 水平上显示差异(P < 0.05); **:表示在 0.01 水平上显著差异(P < 0.01); SOC: 土壤总有机碳 Soil total organic carbon; IOC: 惰性有机碳 Inert organic carbon; POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; LFOC: 轻组有机碳 Light fraction organic carbon; EOC: 易氧化有机碳 Easy oxidation organic carbon; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; SOCS: 总有机储量 Soil total organic carbon storage; BD: 容重 Bulk density; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; C/N: 碳氮比 C/N ratio C/P: 碳磷比 C/P ratio; N/P: 氮磷比 N/P ratio</p>

选取的 7 个土壤理化因子(BD、pH、TN、TP、C/N、C/P 和 N/P)对土壤有机碳及其各组分冗余分析的差异 性解释量如表 4 所示,7 个土壤理化因子在前两个排序轴累计解释了土壤有机碳及其各组分特征的 80.23%, 且对两者关系的累计解释量达 97.5%。可见,冗余分析的前两个排序轴能很好地反映土壤有机碳及其各组分 含量积累与土壤理化因子的关系,且主要由第 I 轴决定。对前两个排序轴进行作图获得冗余分析排序图 (图 7)。结果显示, 土壤 TN、BD 和 TP 的箭头连线较长, 显示这 3 个土壤理化因子对土壤有机碳及其各组分 的含量积累存在显著影响。

Table 4 Redundancy analys	Table 4 Redundancy analysis of contents of soft organic carbon and its fractions									
项目	第Ⅰ轴	第Ⅱ轴	第Ⅲ轴	第Ⅳ轴						
Items	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4						
特征值Eigenvalues	0.7340	0.0683	0.0163	0.0021						
土壤有机碳及其各组分累计解释量 Explained variation (cumulative)/%	73.40	80.23	81.86	82.07						
土壤有机碳及其各组分-土壤因子相关性 Pseudo-canonical correlation	0.9759	0.7324	0.4997	0.4878						
土壤有机碳及其各组分-土壤因子累计解释量 Explained fitted variation (cumulative)/%	89.2	97.5	99.48	99.73						
典范特征值 Canonical eigenvalues	0.8229									
总特征值 Sum of all eigenvalues	1.0000									

土壤有机碳及其各组分的解释变量冗余分析

表 4

图 7 冗余分析排序图

Fig.7 Redundancy analysis ordination diagram

SOC: 土壤总有机碳 Soil total organic carbon; IOC: 惰性有机碳 Inert organic carbon; POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; LFOC: 轻组 有机碳 Light fraction organic carbon; EOC: 易氧化有机碳 Easy oxidation organic carbon; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; SOCS: 总有机储量 Soil total organic carbon storage; BD: 容重 Bulk density; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; C/N: 碳氮比 C/N ratio; C/P: 碳磷比 C/P ratio; N/P: 氮磷比 N/P ratio

进一步对土壤理化因子进行 Monte-Carlo 检验发现(表 5),7 个土壤因子对土壤有机碳及其各组分含量 积累影响均达到了显著或极显著水平,重要性排序依次为:TN>BD>TP>C/P>C/N>N/P>pH。其中,TN、BD、 TP、C/P和C/N对土壤有机碳及其各组分含量积累的影响呈极显著水平(P<0.01),且TN、BD和TP对土壤 有机碳及其各组分含量积累的解释量分别达 57.40%、39.40%和 29.00%,远高于其它因子。而 N/P 和 pH 对 土壤有机碳及其各组分含量积累的影响呈显著水平(P<0.05)。

	Table 5 Importance ranking and significance test of soil physical and chemical factors										
指标 Indexes	重要性排序 Importance ranking	解释量 Explains/%	F	Р							
TN	1	57.4	94.4	0.002							
BD	2	39.4	45.4	0.002							
ТР	3	29	28.6	0.002							
C/P	4	9.7	7.5	0.004							
C/N	5	8.6	6.6	0.006							
N/P	6	5.7	4.2	0.03							
pH	7	5.5	4.1	0.03							

表 5 土壤理化因子的重要性排序和显著性检验结果

3 讨论

3.1 土壤总有机碳分布积累对植被修复措施的响应

西南喀斯特由于长期严重的水土流失,土壤养分和有机碳大量损失,导致土壤特别贫瘠、土壤有机碳储量 明显低于其他生态系统^[22,30]。因此,提升土壤碳固存、增加土壤碳库对于该区碳循环调控、助力碳中和实施 具有明显的科学价值和重要意义。土壤总有机碳含量和储量受凋落物数量和质量、死亡根分解、土壤微生物 活动等多种因素的综合影响^[17]。可见,植被修复能够显著影响土壤有机碳的累积^[31-32],本研究结果也进一 步证实这一结论。在 0—15 cm 土层,乔木、灌木和藤本的植被修复显著提升了土壤总有机碳含量和储量。而 与前人^[33-34]研究结果不一致的是,本研究结果显示,草本的植被修复不仅不能提升土壤有机碳含量和储量。而 与前人^[33-34]研究结果不一致的是,本研究结果显示,草本的植被修复不仅不能提升土壤有机碳含量和储量。 反而在多数情况下降低了土壤有机碳积累。究其原因,一方面与具有丰富凋落物和根系分泌物的乔木、灌木 和藤本相比,本研究的两种草本植物(皇竹草和砂仁)均是经济物种,存在明显的人工刈割和采收,导致凋落 物显著减少,从而降低了有机质的土壤回归^[35-36]。另一方面,则可能与喀斯特生境高度异质有关。同时,样 地中存在明显的基岩裸露,这些裸露岩石对土壤养分具有明显的聚集效应^[2,37],可以将大气沉降的养分和岩 溶作用产生的物质汇聚到其周围土壤中,进一步加剧了喀斯特小生境的异质性。

本研究结果也表明,不同植被修复措施间土壤总有机碳含量和储量也存在显著差异。金银花和柏木修复 的土壤总有机碳含量和储量均显著高于对照样地。可见,柏木等乔木的植被修复明显丰富地表动植物群落, 增加大量凋落物和动物残体等有机质的土壤输入,提高土壤有机碳的累积,这与以往的结果一致^[30,33]。金银 花近地面匍匐生长,地下发达的根系系统能提供较多的根系分泌物,而地上高密度的覆盖在产生大量凋落物 的同时还可以削弱降水对土壤的淋蚀作用,从而显著增加土壤有机碳的累积。人为活动不仅直接改变土壤有 机质的输入^[35],同时会显著影响土壤容重、土壤团聚体结构^[36],进而间接影响土壤有机碳分布积累。在本研 究中,人造柏木林长期封闭,受人为活动影响小,随着修复年限的增加,地表凋落物逐渐累积并能够持续地为 土壤提供碳源。两种草本修复(皇竹草和砂仁)由于人为刈割和采收、凋落物有机质输入减少而导致土壤有 机碳的累积降低。在火龙果植被恢复过程中,虽然其凋落物仅有少量断枝,但在其生长过程中并不需要对土 壤进行频繁地翻耕,因此土壤结构稳定性较好,有利于土壤有机碳的累积。可见,基于植被修复进行土壤有机 碳库调控实践中,不仅要注重修复物种的选择,同时要关注人为活动情况。本研究结果还显示,不同植被修复 措施下土壤有机碳含量和储量垂直剖面上呈现出明显的表聚现象,与前人^[10,38]的研究结果一致。这是因为 土壤表层广布的根系使土壤结构松散,利于微生物对聚集在地表的植被凋落物进行分解^[39],而随着土层的增 加,土壤容重增大,土壤水分、养分和植物根系减少,抑制了土壤微生物活性,进而影响到了土壤有机碳的 累积。

3.2 植被修复对土壤有机碳库组分结构的影响

本研究中,多数土层的人造乔木、灌木和藤本的土壤 EOC、MBC、POC、LFOC 和 IOC 含量均显著高于人工

种草,而土壤 DOC 含量的分布特征并没有遵循这一规律。在 7 种植被修复措施中,花椒的土壤 DOC 含量最少,且显著低于皇竹草和砂仁。分析其原因,一方面由于受植被群落类型、生境条件等因素的影响不同,不同 土壤有机碳组分对植被修复措施的响应程度存在一定的差异。另一方面则与植被修复年限有关。本研究中 花椒的植被恢复年限长达 29 年,花椒的生长已经进入了衰退期^[40-41],地表凋落物有所减少,因此土壤 DOC 易受降水淋失的影响,但此时花椒树对营养元素的需求也相应减弱,降低了土壤有机碳累积矿化量,从而减缓 了作为有机碳矿化主要碳素-缓效性有机碳的消耗,有利于其缓效性有机碳的增加,花椒的土壤 POC 和 LFOC 在 0—15cm 土层均显著高于皇竹草和砂仁也证明了这点。

本研究中,在 0—15 cm 土层,人造乔木林(柏木和柚木种植)和藤林(金银花种植)的活性、缓效性和惰性 有机碳各组分含量均高于对照样地,而人工种草植被修复措施(皇竹草和砂仁种植)的土壤 EOC、POC 和 IOC 含量均显著低于对照样地,土壤 MBC 和 LFOC 则在多数土层中与对照样地无显著差异。这与土壤总有机碳 含量的分布规律有一定的相似性,且除土壤 DOC 外的活性、缓效性和惰性有机碳与总有机碳均呈极显著正相 关,表明这些土壤有机碳组分含量很大程度上依赖于土壤总有机碳,与以往的研究结论相似^[42-43]。进一步分 析表明,相较于对照样地而言,柏木、柚木和金银花植被修复措施显著改变了 0—15 cm 土层土壤 POC、LFOC 和 IOC 含量,而对活性有机碳 EOC、DOC 和 MBC 各组分影响的显著性则在不同土层中存在差异。这说明相 较于其它植被修复措施而言,缓效性和惰性有机碳更容易受到柏木、柚木和金银花植被修复措施的影响。一 方面,人造乔木林和藤本林发达的根系及其分泌物不但可以为缓效性有机碳的胶结提供吸存场所,植被修复 对周边地力条件的改善还有利于土壤缓效性有机碳的累积。另一方面,人造乔木林和藤本林植被修复措施改 变了地表生物的群落组成和地下土壤结构,提高了土壤的稳定性,进而增加了土壤惰性有机碳的累积。

本研究中不同植被修复措施及对照样地的土壤活性、缓效性和惰性有机碳含量占比均表现为:惰性>缓 效性>活性,其中土壤活性有机碳含量占比在不同植被修复措施间并无显著性差异,而土壤缓效性和惰性有 机碳占比存在显著性差异,且活性、缓效性和惰性有机碳两两间达到极显著相关,这表明经过长期的植被修复 过程,土壤有机碳库表现出了活性有机碳向缓效性和惰性有机碳转化的趋势,并最终以惰性有机碳的形式存 储在土壤中^[44]。活性有机碳占比可以反映土壤有机碳库的稳定性,其比例越高,土壤有机碳稳定性越低^[45]。 本研究中,花椒的土壤活性有机碳占比显著低于对照样地,这表明长期植被修复下花椒的土壤有机碳活度较 小,不易被分解矿化,且出现活性有机碳向缓效性有机碳转化的趋势,其缓效性有机碳含量及所占比例的结果 可以佐证。此外,本研究中,砂仁的活性和缓效性有机碳占比与对照样地无显著差异,而惰性有机碳占比显著 低于对照样地,说明人工砂仁草地在长期修复过程中其土壤有机碳稳定性并未增加,加之土壤受人为刈割干 扰,较低的土壤碳库固持能力导致土壤惰性有机碳的不断流失。

3.3 长期植被修复背景下土壤有机碳及其组分分布积累的主要影响因子

长期植被修复措施下,土壤的物理、化学和生物特征以及对养分元素的利用率都将发生明显的变化,土壤 有机碳和各组分的分布积累受到土壤理化性质不同程度的影响^[46-47]。本研究的冗余分析结果也表明,土壤 理化性质显著影响着土壤有机碳和各组分的分布积累,特别是,土壤 TN、BD 和 TP。相关性分析结果也显示, 土壤 TN、TP 和 BD 与土壤有机碳和各组分的分布积累具有极显著正/负相关。肖烨等^[48]的研究结果表明,活 性有机碳组分受到养分元素的影响,在湿地土壤中,DOC、MBC 和 EOC 与土壤 TN、TP 存在极显著的正相关关 系。王玺洋等^[49]的研究认为,土壤 TN 与土壤活性、缓效性和惰性碳均呈极显著正相关。可见,土壤 TN、TP 和 BD 应是长期植被修复背景下土壤有机碳及其组分分布积累的主要影响因子。C、N、P 是土壤生态系统最 为主要的养分元素,与容重等物理性质有机联系、互为影响、协同变化,共同决定着土壤物质循环和养分供给。 因此,在西南喀斯特植被修复过程中,可以通过改善土壤养分元素来提高土壤有机碳和各组分的分布累积。

土壤容重通过影响土壤孔隙度进而影响土壤的通气、持水和入渗能力,是评估不同植被类型土壤质量的 重要指标^[46]。Mendham 等和 Norby 等^[50-51]的研究结果显示,容重较低的土壤中有较多的大孔隙和大团聚体 存在,利于土壤微生物活性增加和植被根系发育,而土壤容重较高则会抑制土壤有机碳的矿化。本研究中长 期的植被修复增大了土壤容重从而抑制了土壤中碳转化过程,因此一定程度上降低土壤容重可以有利于土壤 有机碳和各组分的累积。此外,土壤 pH 对土壤有机碳和各组分的单独解释率最低,且仅与土壤 DOC 呈极显 著正相关,这表明土壤 pH 对土壤有机碳和除土壤 DOC 外各组分含量的影响都较小,仅对土壤 DOC 有较大影 响。前人的研究结果显示^[52],土壤 pH 值介于 6—8 时会增强微生物活性,且这一范围内土壤 pH 的升高可以 促进土壤 DOC 的释放。本研究中土壤 pH 在 6.59—7.96 间,有利于土壤 DOC 含量的累积,因此两者具有较好 的相关性。

4 结论

(1)西南喀斯特长期植被修复显著改变了土壤有机碳及其组分的分布积累。人造乔木和藤本显著提升 土壤有机碳及其各组分的分布积累,但人工种草不仅不能提高土壤有机碳的累积,反而在多数情况下降低了 土壤总有机碳含量和储量以及土壤有机碳各组分含量。

(2)西南喀斯特长期植被修复明显影响着土壤有机碳库组分结构。除人工种草外,植被修复显著提升了 土壤有机碳库中缓效性有机碳的占比。人造花椒明显降低了土壤有机碳库中活性有机碳的占比,而其余修复 措施对活性有机碳的占比无明显影响。柏木种植显著增加了土壤有机碳碳库中的惰性有机碳的比例,而火龙 果和砂仁种明显降低了土壤有机碳碳库中的惰性有机碳的比例。

(3)土壤总氮、总磷和容重是长期植被修复背景下西南喀斯特土壤有机碳及其组分分布积累的主要影响因子。西南喀斯特土壤总氮、总磷和容重与土壤有机碳在植被修复过程中有机联系、互为影响、协同变化,共同决定着土壤物质循环和养分供给。

参考文献(References):

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Sheng M Y, Xiong K N, Wang L J, Li X N, Li R, Tian X J. Response of soil physical and chemical properties to Rocky desertification succession in South China Karst. Carbonates and Evaporites, 2018, 33(1): 15-28.
- [3] Mao X L, Van Zwieten L, Zhang M K, Qiu Z T, Yao Y C, Wang H L. Soil parent material controls organic matter stocks and retention patterns in subtropical China. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(5): 2426-2438.
- [4] 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.
- [5] Yuan G Y, Huan W W, Song H, Lu D J, Chen X Q, Wang H Y, Zhou J M. Effects of straw incorporation and potassium fertilizer on crop yields, soil organic carbon, and active carbon in the rice-wheat system. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104958.
- [6] Wang C, Fang Y Y, An W L, Zeng C S, Wang W Q, Sardans J, Fernández-Martínez M, Peñuelas J. Acid rain mediated nitrogen and sulfur deposition alters soil nitrogen, phosphorus and carbon fractions in a subtropical paddy. CATENA, 2020, 195: 104876.
- [7] 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.
- [8] Knorr W, Prentice I C, House J I, Holland E A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. Nature, 2005, 433(7023): 298-301.
- [9] Zhang Y W, Shangguan Z P. The coupling interaction of soil water and organic carbon storage in the long vegetation restoration on the Loess Plateau. Ecological Engineering, 2016, 91: 574-581.
- [10] Zhang Y H, Xu X L, Li Z W, Liu M X, Xu C H, Zhang R F, Luo W. Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2657-2665.
- [11] 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.
- [12] 赵元,张伟,胡培雷,肖峻,王克林.桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被恢复方式下土壤有机碳组分变化特征.生态学报,2021,41(21): 8535-8544.
- [13] 李文杰, 张祯皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉. 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化 及与碳库组分的关系. 环境科学, 2022, 43(2): 1050-1058.

- [14] 苏静,赵世伟,马继东,杨永辉,刘娜娜.宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响.水土保持研究,2005,12(3):50-52,179.
- [15] Romigh M M, Davis III S E, Rivera-Monroy V H, Twilley R R. Flux of organic carbon in a riverine mangrove wetland in the Florida Coastal Everglades. Hydrobiologia, 2006, 569(1): 505-516.
- [16] Nelson J D J, Schoenau J J, Malhi S S. Soil organic carbon changes and distribution in cultivated and restored grassland soils in Saskatchewan. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 82(2): 137-148.
- [17] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, Yin Y F, Gao R, Lin C F. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China. Plant and Soil, 2009, 323(1): 153-162.
- [18] 王伟,李占斌,李鹏,王飞超,张祎.生态建设对坡面土壤有机碳分布的影响.水土保持研究,2020,27(2):35-41.
- [19] 邓翠,吕茂奎,曾敏,张康靖,任寅榜,聂阳意,谢锦升.红壤侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳组分变化.水土保持学报,2017,31
 (4):178-183.
- [20] Peng X D, Dai Q H, Ding G J, Shi D M, Li C L. The role of soil water retention functions of near-surface fissures with different vegetation types in a rocky desertification area. Plant and Soil, 2019, 441(1/2); 587-599.
- [21] 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.
- [22] Lan J C. Responses of soil organic carbon components and their sensitivity to karst rocky desertification control measures in Southwest China. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(2): 978-989.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] Leavitt S W, Follett R F, Paul E A. Estimation of slow- and fast-cycling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis. Radiocarbon, 1996, 38 (2): 231-239.
- [25] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, Lafond G P, Townley-Smith L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1799-1806.
- [26] Blair G J, Lefroy R, 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.
- [27] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. Geoderma, 2003, 113(3/4): 357-380.
- [28] Jenkinson D, Brookes P, Powlson D. Measuring soil microbial biomass. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36: 5-7.
- [29] 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.
- [30] Zhang Z M, Zhou Y C, Wang S J, Huang X F. The soil organic carbon stock and its influencing factors in a mountainous karst basin in P. R. China. Carbonates and Evaporites, 2019, 34(3): 1031-1043.
- [31] Zhu H H, He X Y, Wang K L, Su Y R, Wu J S. Interactions of vegetation succession, soil bio-chemical properties and microbial communities in a Karst ecosystem. European Journal of Soil Biology, 2012, 51: 1-7.
- [32] Liu S J, Zhang W, Wang K L, Pan F J, Yang S, Shu S Y. Factors controlling accumulation of soil organic carbon along vegetation succession in a typical karst region in Southwest China. Science of the Total Environment, 2015, 521/522: 52-58.
- [33] 滕秋梅, 沈育伊, 徐广平, 张中峰, 张德楠, 周龙武, 黄科朝, 孙英杰, 何文. 桂北喀斯特山区不同植被类型土壤碳库管理指数的变化特征. 生态学杂志, 2020, 39(2): 422-433.
- [34] 廖洪凯, 龙健. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2253-2258.
- [35] Austin A T, Ballaré C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(10): 4618-4622.
- [36] Pan F J, Zhang W, Liang Y M, Liu S J, Wang K L. Increased associated effects of topography and litter and soil nutrients on soil enzyme activities and microbial biomass along vegetation successions in karst ecosystem, southwestern China. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(17): 16979-16990.
- [37] Huang X F, Zhang Z M, Zhou Y C, Wang X F, Zhang J C, Zhou X W. Characteristics of soil organic carbon under different karst landforms. Carbonates and Evaporites, 2021, 36(3): 40.
- [38] 董凌勃,海旭莹,汪晓珍,邓蕾,李斌斌,刘玉林,李继伟,李妙宇,吕文文,上官周平.黄土高原退耕还草地植物群落动态对生态系统 碳储量的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8559-8569.
- [39] Jobbágy E G, Jackson R B. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. Biogeochemistry, 2001, 53(1): 51-77.
- [40] Liao H K, Long J, Li J. Conversion of cropland to Chinese prickly ash orchard affects soil organic carbon dynamics in a karst region of southwest China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 104(1): 15-23.

[41]	张文娟, 廖洪凯,	龙健, 李娟,	刘灵飞.	中植花椒对喀斯特石漠化地区	土壤有机碳矿化	化及活性有机碳的影响.	环境科学,	2015,	36(3):
	1053-1059.								

- [42] Wang J Y, Song C C, Wang X W, Song Y Y. Changes in labile soil organic carbon fractions in welland ecosystems along a latitudinal gradient in Northeast China. CATENA, 2012, 96: 83-89.
- [43] Xiao Y, Huang Z G, Lu X G. Changes of soil labile organic carbon fractions and their relation to soil microbial characteristics in four typical wetlands of Sanjiang Plain, Northeast China. Ecological Engineering, 2015, 82; 381-389.
- [44] 蒋小董,郑嗣蕊,杨咪咪,万家鸣,黄悦,余可,佟小刚.毛乌素沙地固沙林发育过程中土壤有机碳库稳定性特征.应用生态学报,2019, 30(8):2567-2574.
- [45] Sahoo U K, Singh S L, Gogoi A, Kenye A, Sahoo S S. Active and passive soil organic carbon pools as affected by different land use types in Mizoram, Northeast India. PLoS One, 2019, 14(7): e0219969.
- [46] Anh P T Q, Gomi T, MacDonald L H, Mizugaki S, Khoa P V, Furuichi T. Linkages among land use, macronutrient levels, and soil erosion in northern Vietnam: A plot-scale study. Geoderma, 2014, 232/233/234: 352-362.
- [47] De Neve S, Hofman G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30(5): 544-549.
- [48] 肖烨,黄志刚,武海涛,吕宪国.三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异.生态学报,2015,35(23):7625-7633.
- [49] 王玺洋,于东升,廖丹,潘剑君,黄标,史学正.长三角典型水稻土有机碳组分构成及其主控因子.生态学报,2016,36(15):4729-4738.
- [50] Mendham D S, Sankaran K V, O'Connell A M, Grove T S. *Eucalyptus globulus* harvest residue management effects on soil carbon and microbial biomass at 1 and 5 years after plantation establishment. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(12): 1903-1912.
- [51] Norby R, Warren J, Iversen C, Medlyn B, McMurtrie R. CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(45): 19368-19373.
- [52] Grybos M, Davranche M, Gruau G, Petitjean P, Pédrot M. Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions. Geoderma, 2009, 154(1/2): 13-19.