

红壤侵蚀区不同植被恢复模式土壤有机碳含量、密度及储量分布特征

李鹏^{1,3}, 刘晓君², 刘苑秋^{3,3*}, 陶凌剑^{1,3}, 付小斌^{1,3}, 毛梦蕾^{1,3}, 李文琴^{1,3}, 汪晨^{1,3}

(1.江西农业大学/鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 南昌 330045; 2.宁夏大学农学院, 银川 750021; 3.江西省森林培育重点实验室, 南昌 330045)

摘要:【目的】为了明确红壤侵蚀区不同植被恢复模式土壤有机碳的分布特征。【方法】以经过 27 年植被恢复与重建后的 6 种林分为研究对象, 以未加人工干扰的自然恢复地为对照, 设置 20×20 m 的标准样地, 采集 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 土层的土壤样品, 测定其有机碳含量、土壤容重等理化性质, 探究红壤侵蚀区土壤有机碳含量及有机碳密度的分布特征。【结果】(1) 对比自然恢复地, 6 种人工植被恢复模式的 SOC 含量均显著增加 ($p < 0.05$), 在不同人工植被恢复模式之间 0~20 cm 土层的 SOC 含量也存在显著差异 ($p < 0.05$), 表现为木荷纯林 > 湿地松木荷混交林 > 湿地松补植木荷 > 马尾松补植木荷 > 湿地松纯林 > 马尾松纯林, 20~40 cm 土层的 SOC 含量则无显著差异。(2) 研究区 7 种植被恢复模式不同土层的土壤有机碳含量分布规律基本一致, 均随着土壤深度的增加 SOC 含量呈现减少的趋势, 但不同植被恢复模式 SOC 减少的幅度不同, 其中木荷纯林减少的幅度最大, 自然恢复地减少的幅度最小。(3) 土壤有机碳密度变化规律与土壤有机碳含量变化规律基本一致 ($r = 0.978$, $p < 0.01$, 皮尔逊双尾检验), 土壤含水率、容重、孔隙度和全氮对土壤有机碳有显著影响。

(4) 在研究区 85.85 hm² 范围内 0~40 cm 土层有机碳储量为 7317.87 Mg C, 其中湿地松木荷混交林土壤有机碳储量最大, 为 1840.58 Mg C, 马尾松补植木荷林土壤有机碳储量最小, 为 432.97 Mg C。【结论】对比自然恢复, 人工植被恢复与重建在红壤侵蚀区效果显著, 在研究区今后的建设中应优先选择木荷等优势树种进而增强土壤固碳能力。

关键词: 红壤侵蚀区; 植被恢复; 碳密度; 分布特征; 土壤固碳

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

文章编号:

Distribution characteristics of soil organic carbon in different vegetation restoration patterns in red soil erosion areas

Li Peng^{1,3}, Liu Xiaojun², Liu Yuanqiu^{1,3*}, Tao Lingjian^{1,3}, Fu Xiaobin^{1,3}, Mao Menglei^{1,3}, Li Wenqin^{1,3}, Wang Chen^{1,3}

1. Jiangxi Agricultural University/ Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed, Nanchang 330045, Jiangxi, China; 2. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Silviculture, Nanchang 330045, Jiangxi, China

Abstract: [Objective] To clarify the distribution characteristics of soil organic carbon in different vegetation restoration modes in the red soil erosion area. [Method] Taking six types of forest stands after 27 years of artificial vegetation restoration and reconstruction as the research objects, and natural restoration sites without artificial disturbance were used as controls. 20×20 m standard sample plots were set up, and soil samples were collected from 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, and 30~40 cm soil layers to determine their organic carbon content, soil capacity, and other physicochemical properties to investigate the distribution characteristics in the red soil erosion area, and to estimate the carbon storage capacity of soil layers in the study area. [Result] (1) Compared with the natural restoration site, the SOC content of all six artificial vegetation restoration modes increased significantly ($p < 0.05$), and the

*文由国家自然科学基金青年项目 (42107365) 资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42107365).

2023-xx-xx Received,

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyq404@163.com

SOC content of the 0~20 cm soil layer also differed significantly ($p < 0.05$) among the different artificial vegetation restoration modes, which showed that $SS > MES > RES > RMS > PE > PM$. There was no significant difference in SOC content in the 20~40 cm soil layer. (2) The distribution patterns of soil organic carbon content in different soil layers of the seven vegetation restoration modes in the study area were basically the same, and all showed a trend of decreasing SOC content with increasing soil depth, but the magnitude of SOC reduction in different vegetation restoration modes was different, among which the magnitude of reduction was the largest in the pure forest of *Schima superba* and the smallest in the natural restoration site. (3) The pattern of change in soil organic carbon density was generally consistent with the pattern of change in soil organic carbon content ($r = 0.978$, $p < 0.01$, Pearson two-tailed test). Soil moisture content, bulk density, porosity and total nitrogen had significant effects on soil organic carbon. (4) The organic carbon stock in the 0~40 cm soil layer within 85.85 hm² of the study area was 7317.87 Mg C. The largest organic carbon stock was 1840.58 Mg C in the MES, and the smallest organic carbon stock was 432.97 Mg C in the RMS. [Conclusion] Artificial vegetation restoration and rehabilitation are effective in red soil erosion areas, and in the future construction of the study area, preference should be given to dominant tree species such as mullein in order to enhance soil carbon sequestration capacity.

Key words: Red soil erosion area; vegetation restoration; carbon density; distribution characteristics; Soil carbon sequestration

陆地生态系统碳循环是全球碳循环中的重要部分(Canadell et al., 2000), 土壤是陆地生态系统最大的碳库, 有研究表明陆地生态系统中土壤有机碳(SOC) 储量比大气中碳库高 2~3 倍(Stockmann et al., 2013)。土壤有机碳是土壤碳库的重要存在形式, 也是维持陆地生态系统结构和功能的重要基础(Soucémariadin et al., 2018)。但是由于自然因素或者人为破坏造成的陆地生态系统退化已经严重影响了土壤碳库的稳定和固持能力(Van Straaten et al., 2015), 甚至成为仅次于化石燃料燃烧的人为 CO₂ 排放源(Van der Werf et al., 2009)。植被恢复普遍被认为是提升退化土壤有机碳固持的有效措施(Bastin et al., 2019; Xiao et al., 2017), 然而土壤碳库恢复往往滞后于植被, 且不同植被恢复模式之间差异较大(Li D 等, 2012; Wei et al., 2013)。因此, 要想正确认识退化区域土壤固碳能力, 实现植被恢复可持续发展就得明确不同植被恢复模式土壤有机碳的分布特征。

以往学者的研究表明在植被恢复过程中土壤有机碳的积累存在很大的不确定性, 关于植被恢复后土壤有机碳含量显著增加(Deng et al., 2016)、减少(Rong et al., 2020)或者无显著变化(Chen et al., 2017)的报道均有存在, 甚至在不同研究区的研究结果也有较大差异(赵元等, 2021), 这一现象可能与气候、恢复年限、土壤母质、植被恢复类型等因素有关(Deng L 等, 2014; Xiao L 等, 2021)。南方红壤丘陵区土壤侵蚀面积约占 15%, 已经成为仅次于黄土高原的第二大土壤侵蚀区(梁音等, 2008)。目前已有学者对南方红壤侵蚀区的土壤碳库特征做了初步研究, 如李燕燕等(李燕燕等, 2020)研究了红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 的特征; Xiao 等(Xiao et al., 2020)分析了赣南退化红壤区不同植被恢复年限土壤有机碳密度的动态变化特征; 辜翔等(辜翔等, 2018)采用时空代替法揭示了湘中红壤丘陵区不同植被恢复阶段土壤有机碳含量、碳密度的分布特征。但是, 针对红壤侵蚀区长期植被恢复后不同植被恢复模式土壤有机碳密度、储量分布特征的研究还比较缺乏。

江西退化红壤森林植被恢复国家长期科研基地是典型退化红壤丘陵区。本研究以江西退化红壤森林植被恢复国家长期科研基地经过 27 年人工植被恢复重建的 6 种林分为研究对象, 以未加人工干扰的自然恢复地为对照, 分析不同植被恢复模式、不同土层深度土壤有机碳含量、密度的分布特征, 并估算研究区植被恢复土壤有机碳储量, 揭示研究区植被恢复土壤碳储量的分布规律, 为退化红壤区生态修复及碳库管理提供科学支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处江西省泰和县石山乡, 位于 26° 54' ~26° 55' N, 114° 48' ~114° 49' E, 为典型的亚热带湿润季风气候, 水热资源丰富, 年平均气温 18.6 °C, 年降雨量为 1726 mm, 年均日照时数为 1756.4 h。研究区土壤母质为第四纪红土, 表层石砾含量较多, 属于典型的红壤低丘岗。由于长期的乱砍滥伐、过

度放牧、割灌铲草，导致土壤侵蚀严重、土地贫瘠，仅有一些干旱和半干旱草（狗牙根属）零星分布，土壤有机质含量极低（6.5 g/kg）(Wei et al., 2013)。1991 年为响应江西省政府“消灭荒山”战略，在该区开展荒山造林植被恢复试验研究，选用湿地松(*Pinus elliottii*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、晚松(*Pinus serotina*)、火炬松(*Pinus taeda*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、木荷(*Schima superba*)、油桐(*Vernicia fordii*)等树种，采取不同配置模式(针×针、针×阔、阔×阔)进行植被恢复试验，共 84 个小班连片分布。目前，试验区已郁闭成林。

表 17 种植物恢复模式的基本情况

Table 1 General characteristics of seven vegetation restoration patterns

植被恢复模式 Vegetation restoration model	面积 Area (hm ²)	样地号 Sample plot number	优势树种 Advantageous tree species	恢复年限 Restoration years/a	平均胸径 Average DBH (cm)	平均树高 Average tree height (m)
PM	17.16	25、30、44、64、 81	马尾松 (<i>Pinus massoniana</i>)	27	11.40±0.75	7.39±0.26
PE	17.74	11、19、48-1、48- 2、84	湿地松 (<i>Pinus elliottii</i>)	27	17.32±2.05	8.98±0.74
SS	11.61	29、38、54、72、 75	木荷 (<i>Schima superba</i>)	27	11.63±0.32	9.02±0.76
MES	5.46	22、57、58、60、 73	湿地松 (<i>Pinus elliottii</i>)、 木荷 (<i>Schima superba</i>)	27	13.64±0.47	9.33±0.63
RMS	19.07	1、6、13、31、32	马尾松 (<i>Pinus massoniana</i>)、 木荷 (<i>Schima superba</i>)	初植马尾松， 2010 年补植木荷	14.08±0.36	8.39±0.33
RES	14.81	16、45、46、47、 68	湿地松 (<i>Pinus elliottii</i>)、 木荷 (<i>Schima superba</i>)	初植湿地松， 2006 年补植木荷	14.18±0.44	7.91±0.15
CK	-	2、20、71 旁	金樱子(<i>Rosa laevigata</i>)、 狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	27	-	-

不同字母分布对应不同的植被恢复模式：马尾松纯林 PM，湿地松纯林 PE，木荷纯林 SS，湿地松木荷混交林 MES，马尾松补植木荷 RMS，湿地松补植木荷 RES，自然恢复地 CK。Different letter distributions correspond to different vegetation restoration modes: PM, *Pinus massoniana* Pure Forest; PE, *Pinus elliottii* Pure Forest; SS, *Schima superba* Pure Forest; MES, *P.elliottii* and *S.superba* Mixed Forest; RMS, Replanting *S.superba* with *P. massoniana*; RES, Replanting *S.superba* with *P.elliottii*; Natural recovery CK. 下同 The same below.

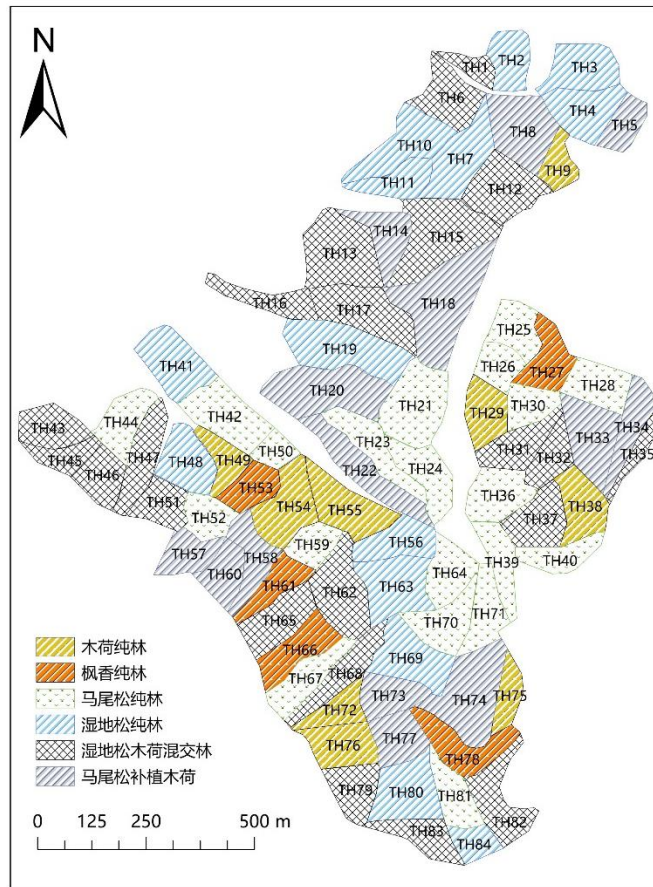


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 试验设计、土壤样品的采集与测定

在泰和植被恢复基地 85.85 hm² 范围内选取 6 种典型人工植被恢复类型（马尾松纯林、湿地松纯林、木荷纯林、马尾松补植木荷林、湿地松补植木荷林和湿地松木荷混交林），每种植被恢复类型设置 5 个 20 m×20 m 的标准样地。此外，在基地外选择 5 个未加人工干扰的自然恢复样地作为对照。于 2018 年 7 月在每个样地内按对角线均匀挖取 3 个土壤剖面，共 105 个剖面。已有研究表明红壤侵蚀地不同植被恢复措施对于 40 cm 以下土壤有机碳含量影响不大(刘政等, 2019; 张浩等, 2016)，且在本研究地点土壤深度约为 3~40 cm(Wei et al., 2013)。因此本研究以 40 cm 为采样深度，按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 分层，从下而上采集土壤样品，同时用环刀法测定土壤容重、含水率。野外采回的土样经自然风干、研磨、过筛后进行土壤有机碳含量的测定。土壤有机碳测定采用重铬酸钾容量法-外加热法(H₂SO₄-K₂Cr₂O₇)，土壤容重和孔隙度的测定采用环刀法，土壤含水率采用烘干法，pH 采用电极法，全氮(Total nitrogen)、全磷(Total phosphorus)采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮法，全自动间断化学分析仪(Smart chem 200 Alliance Corp. France)上机测定(鲍士旦, 2008)。

1.3 数据分析与处理

土壤有机碳密度及有机碳储量参考王勇辉(王勇辉和焦黎, 2016)等和李瑾璞(李瑾璞等, 2020)等人研究中的计算方法:

土壤有机碳密度计算公式如下:

$$SOC D_i = C_i \times \rho_i \times H_i \times 10^{-1} \tag{1}$$

式中: $SOC D_i$ 为第 i 层土壤有机碳密度 (Mg/hm²); C_i 为第 i 层土壤有机碳含量 (g/kg); ρ_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm³), H_i 为剖面深度 (cm); 10⁻¹ 为单位转换系数。

土壤有机碳储量($SOC_{storage}$)计算公式如下:

$$SOC_{storage} = \sum_{i=1}^n S_i \times SOCD_i \quad (2)$$

式中: S_i 为研究区某种植被恢复类型的面积 (hm^2)

样品数据录入后, 采用 SPSS 27.0 对不同植被恢复类型和不同土层深度的有机碳含量/密度差异进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), LSD 法进行差异显著性检验($P < 0.05$); 采用皮尔逊相关分析(Pearson correlation coefficient)探究土壤有机碳密度的影响因素, 使用 Origin2022 和 ArcGIS10.8.1 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式间土壤有机碳含量变化

由图 2 可以看出, 在 0~40 cm 土层, 退化红壤区 6 种人工植被恢复模式相较自然恢复样地的 SOC 含量均有显著增加 ($p < 0.05$)。比较 6 种人工植被恢复模式发现, 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中 SOC 含量存在显著差异 ($p < 0.05$), 表现为木荷纯林>湿地松木荷混交林>湿地松补植木荷>马尾松补植木荷>湿地松纯林>马尾松纯林>自然恢复样地; 在 20~30 cm 和 30~40 cm 土层中无显著差异。

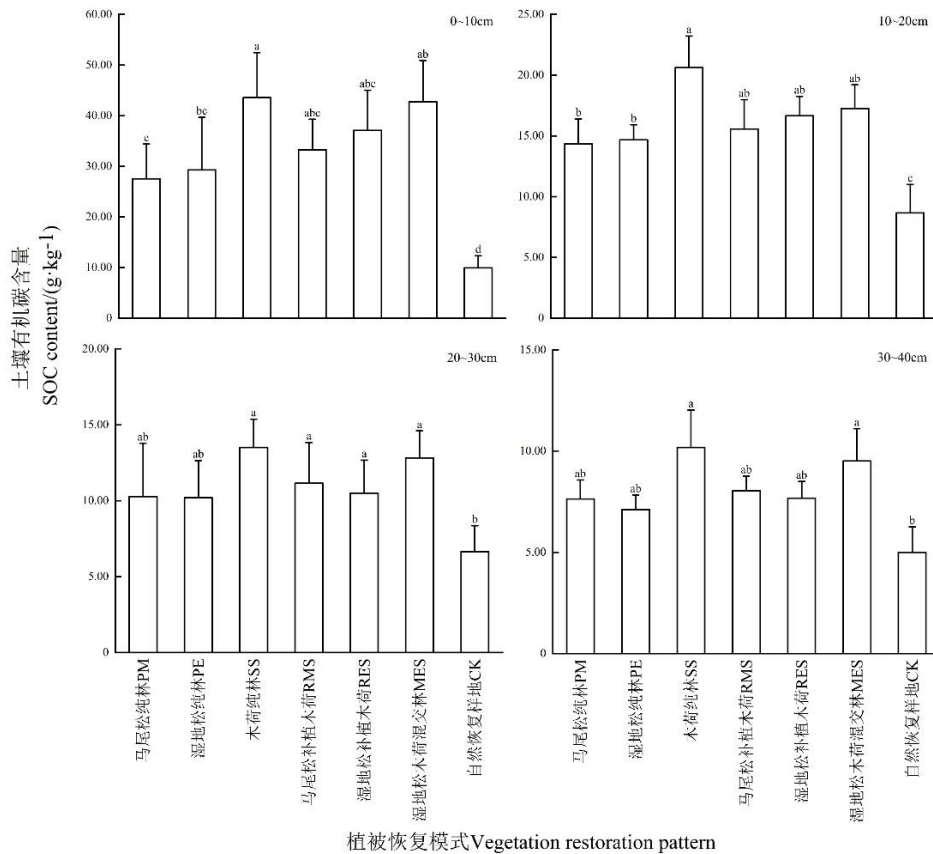


图 2 不同植被恢复模式间土壤有机碳含量特征

Fig. 2 Characteristics of soil organic carbon content among different vegetation restoration patterns

不同小写字母表示相同土壤深度的不同植被恢复模式间的土壤有机碳含量差异显著 ($p < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences in soil organic carbon content between vegetation restoration patterns with the same soil depth ($p < 0.05$).

2.2 不同植被恢复模式间土壤有机碳含量垂直分布特征

从图 3 中可以看出, 所有植被恢复模式不同土层的 SOC 含量分布规律基本一致, 均表现出较强的表聚效应, 即 0~10 cm 表层 SOC 含量最多, 且随着土壤深度的增加 SOC 含量呈现减少的趋势, 但不同植被

恢复模式 SOC 减少的幅度不同。其中木荷纯林减少的幅度最大，0~10 cm 土层 SOC 含量与 30~40 cm 土层相差 33.26 g/kg，其次为湿地松木荷混交林、湿地松补植木荷、马尾松补植木荷、湿地松纯林、马尾松纯林，自然恢复地不同土层之间的差异最小，仅相差 4.90 g/kg。不同植被恢复模式 0~20 cm 土层 SOC 含量均占 0~40 cm 土层范围内的 60% 以上。

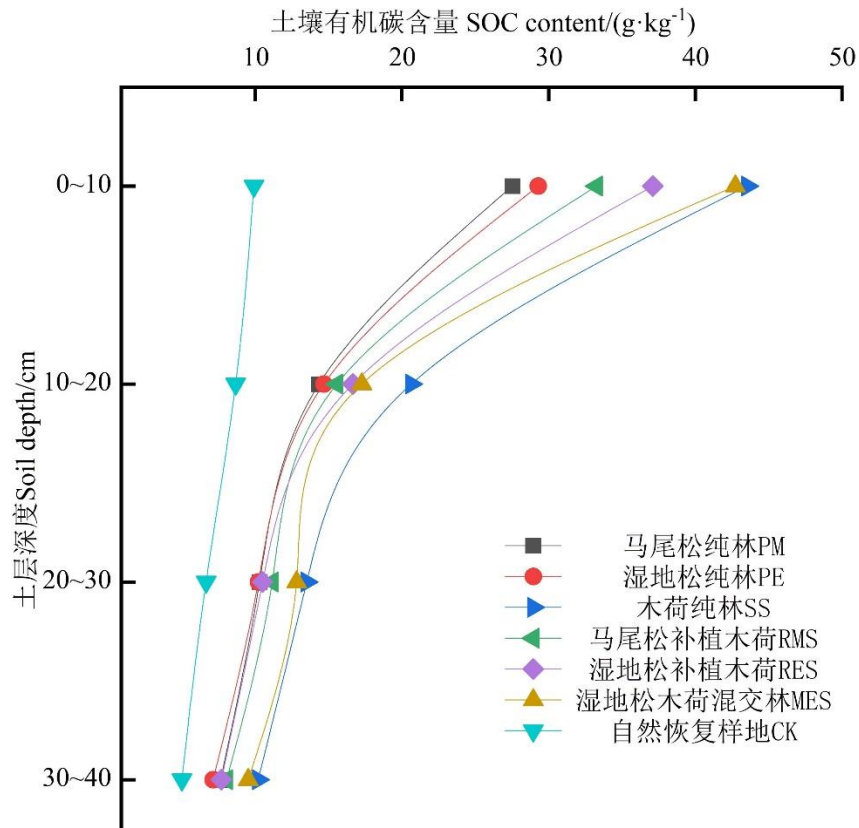


图 3 不同植被恢复模式间土壤有机碳含量垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of soil organic carbon content between different vegetation restoration patterns

2.3 不同植被恢复模式间土壤有机碳密度差异

从图 4 中可以看出，不同植被恢复模式之间土壤有机碳密度存在显著差异 ($p < 0.05$)，其中在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层，SOC 密度规律为木荷纯林 > 湿地松木荷混交林 > 马尾松补植木荷 > 湿地松补植木荷 > 湿地松纯林 > 马尾松纯林 > 自然恢复样地；20~30 cm 土层，木荷纯林 > 湿地松木荷混交林 > 马尾松补植木荷 > 湿地松纯林 > 马尾松纯林 > 湿地松补植木荷 > 自然恢复样地；30~40 cm 土层，木荷纯林 > 湿地松木荷混交林 > 马尾松补植木荷 > 马尾松纯林 > 湿地松补植木荷 > 湿地松纯林 > 自然恢复样地。总体而言，土壤有机碳密度变化呈现出随土壤剖面深度的增加而减少的趋势，在 0~40 cm 土层范围内，六种人工植被恢复模式 SOC 密度均显著大于自然植被恢复样地 ($p < 0.05$)。

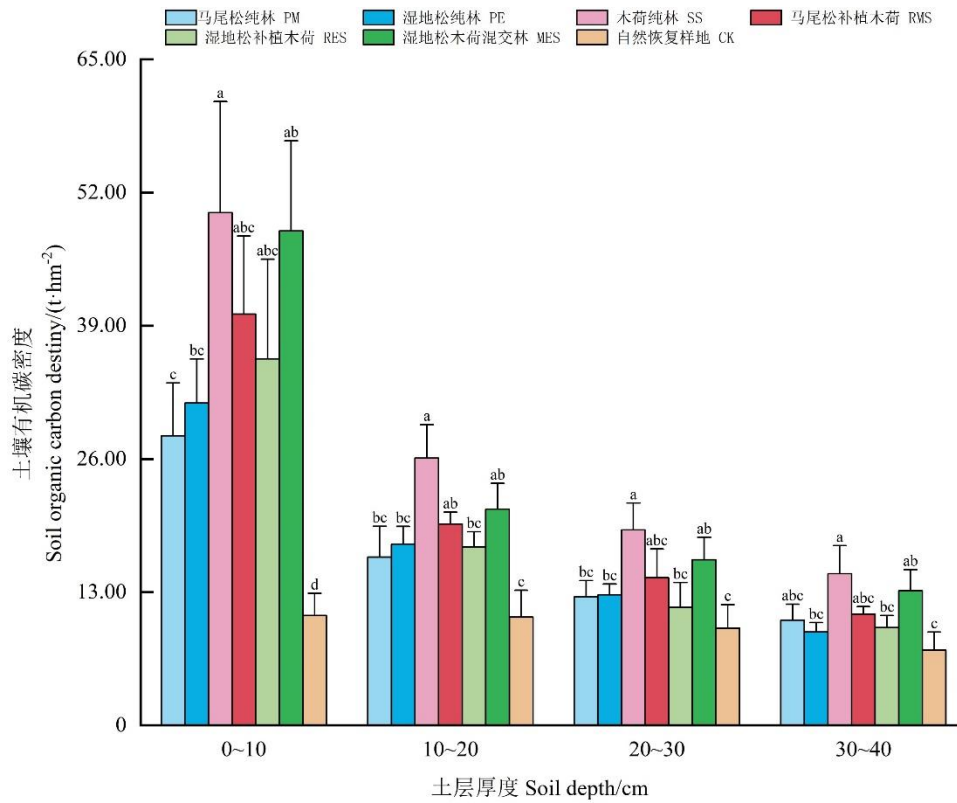


图 4 不同植被恢复模式土壤有机碳密度分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of soil organic carbon density in different vegetation restoration patterns

不同小写字母表示相同土壤深度的不同植被类型间的土壤有机碳密度差异显著 ($p < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences in soil organic carbon density between vegetation restoration patterns with the same soil depth ($p < 0.05$).

2.4 土壤有机碳的影响因素

从表 2 中可以看出,不同植被恢复模式 SOC 含量与土壤容重之间均呈现显著负相关 ($p < 0.05$),与全氮含量呈现极显著正相关 ($p < 0.01$); 除湿地松纯林、湿地松木荷混交林 SOC 含量与含水量、孔隙度不相关外,其余植被恢复模式 SOC 含量与含水量、孔隙度均呈现显著正相关 ($p < 0.05$); SOC 含量与全磷含量仅在木荷纯林、马尾松补植木荷和湿地松补植木荷 3 种植物恢复模式中呈现出极显著正相关,与 pH 仅在湿地松木荷混交林和自然恢复地 2 种植物恢复模式中呈现极显著负相关 ($p < 0.01$)。

表 2 土壤有机碳密度与土壤理化性状之间的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson's correlation coefficient between soil organic carbon density and soil physicochemical properties

相关因子 Correlation factor	相关系数 Correlation coefficient						
	PM	PE	EE	MES	RMS	RES	CK
SOC 与 BD	-	-	-	-	-	-	-
	0.418*	0.445*	0.488*	0.309*	0.608*	0.624*	0.975*
SOC 与含水量	0.481*	0.407*	0.677**	0.353*	0.610*	0.477*	0.951**
SOC 与孔隙度	0.550*	0.514*	0.829**	0.392*	0.610*	0.675**	0.972**
SOC 与 TN	0.939**	0.821**	0.897**	0.608**	0.895**	0.979**	0.519**
SOC 与 TP	-0.06	0.132	0.680**	0.109	0.638**	0.871**	0.215
SOC 与 pH	0.267	-	-	-	-	-	-
		0.421	0.330	0.663**	0.423	0.344	0.983**

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

2.5 植被恢复土壤有机碳储量分布特征

本研究估算了江西省退化红壤植被恢复国家长期科研基地 85.85 hm² 范围内经过 27 年植被恢复与重建后不同植被恢复模式的土壤有机碳密度(表 3), 研究区土壤总碳储量为 7317.87 Mg C, 有机碳含量为 17.57 g/kg, 碳密度为 85.87 Mg C/hm²。其中湿地松木荷混交林土壤有机碳储量最大, 不同土层深度的土壤有机碳储量范围为 212.18~717.70 Mg C, 总碳储量为 1840.58 Mg C; 其次为湿地松补植木荷、湿地松纯林、木荷纯林、马尾松纯林; 马尾松补植木荷的土壤有机碳储量最低, 不同土壤深度的范围为 59.19~187.98 Mg C, 总碳储量仅为 432.97 Mg C。

表 3 退化红壤区植被恢复土壤有机碳储量

Table 3 Soil organic carbon stocks in revegetated red soil areas with degradation

土层厚度 Soil depth/cm	马尾 松纯林 PM	湿地松 纯林 PE	木荷 纯林 SS	马尾松 补植木荷 RMS	湿地松 补植木荷 RES	湿地松木 荷混交林 MES
0~10	461.19	678.81	478.49	187.98	676.59	717.70
10~20	281.77	313.64	302.79	107.18	331.82	633.52
20~30	215.19	225.83	221.29	78.62	219.50	277.17
30~40	176.06	161.61	171.83	59.19	181.93	212.18
总计 Total	1134.21	1379.89	1174.39	432.97	1409.83	1840.58

3 讨 论

3.1 红壤侵蚀区长期植被恢复后土壤有机碳分布特征

本研究发现江西省退化红壤植被恢复国家长期科研基地 0~40 cm 土层有机碳储量为 7317.87 Mg C, 有机碳含量为 17.57 g/kg, 有机碳密度为 85.87 Mg C/hm²。与其他红壤侵蚀区的研究结果相比, SOC 含量、密度较高(表 4)。这主要是与植被恢复类型有关, 植被类型在很大程度上影响着土壤碳库, 土壤有机碳含量即使在同一地区或同一气候条件下, 也可能会因植被类型不同而产生较大的差异(Deng et al., 2013; Zhao et al., 2015)。然而, 像本研究区这样创新性的直接引用当地顶极物种(Du et al., 2008)来恢复土壤严重侵蚀退化区域并取得巨大成功的案例很少, 本研究区植被恢复的成功对我国南方红壤侵蚀区大规模造林和再造林工程具有一定的参考意义。

表 4 不同红壤侵蚀区植被恢复土壤有机碳密度、含量对比

Table 4 Comparison of soil organic carbon density and content in different red soil erosion areas with vegetation

红壤侵蚀区 Red soil erosion area	恢复年限 Recovery years (a)	土层深度 Soil depth (cm)	土壤有机碳含量 SOC content (g·kg ⁻¹)	土壤有机碳密度 SOC density (Mg C·hm ⁻²)
湘中(辜翔等, 2018; 王振鹏等, 2020)	26	40	12.16	71.40
湘东(张杰等, 2018)	20	20	11.85	-
闽西(谢锦升等, 2006)	24	40	-	27.28
赣南(Xiao et al., 2020)	24	40	-	49.45
本研究基地	27	40	17.57	85.87

3.2 不同植被恢复模式土壤有机碳含量、密度分布特征

本研究发现对比自然恢复地, 6种人工植被恢复模式 0~40 cm 土层范围内的 SOC 含量均显著增加 ($p < 0.05$), 这与 Wei 等(Wei et al., 2013)对本研究区 5 种林分经过 17 年植被恢复后的研究结果相似, 但与刘苑秋等(刘苑秋等, 2004)对本研究区植被恢复早期的研究结果不一致, 这是由于自然恢复地虽然没有进行人工重建植被, 但在不樵采、不放牧的保护措施下一些阳性草本植物恢复较快, 地表植被盖度达 90%, 在植被恢复早期(10 年)地表植物现存量大于重建森林的林下植被, 因而有一定量的凋落物(刘苑秋等, 2004)。SOC 主要来源于植被地上枯落物及其地下根系的分解和周转(Laganière et al., 2010), 因此自然恢复地在植被恢复早期(10 年)SOC 含量高于人工重建植被, 然而随着恢复年限的增加, 人工植被恢复种植的乔木根系逐渐发达, 较自然恢复地表层凋落物更多, 有机物输入量更大(王志齐等, 2016), SOC 含量明显高于自然恢复地。不同人工植被恢复模式之间 0~20 cm 土层范围内 SOC 含量也存在差异, 其中木荷纯林 SOC 含量显著高于马尾松纯林和湿地松纯林 ($p < 0.05$)。其原因一方面是湿地松和马尾松凋落物较少且存在大量顽固的化合物, 导致其分解速率较低并且减慢了颗粒有机物向矿质土壤转化的速度, 而木荷纯林的凋落物产量大, 分解速率快(Wang et al., 2012), 导致木荷纯林表层 SOC 含量显著高于马尾松纯林和湿地松纯林; 另一方面是由于木荷纯林的地下根系发达且向更大范围伸展, 有效改善了土壤贮水功能和孔隙度(袁星明等, 2022)。土壤水分得到改善后提高了植物生产力, 减缓了有机碳矿化速率(Dong et al., 2015)。土壤孔隙度增大有利于土壤中水分和气体的运移与交换(许婷婷等, 2022), 可以更好地固持有有机碳中的颗粒物, 引起颗粒有机碳的变化, 促进有机碳的积累(陈美玲等, 2022)。不同人工植被恢复模式 20~40 cm 土层范围内 SOC 含量差异不显著 ($p < 0.05$), 是由于发育于同一母质的深层土壤, 受植物凋落物、根系的影响程度减弱, 使得不同植被恢复模式之间 SOC 含量的差异也随着土壤深度的增加而减弱(王振鹏等, 2020)。此外, 与众多研究结果一致(邓翠等, 2017; 区晓琳等, 2018; Xiao L 等, 2021), 本研究区 SOC 含量分布呈现随土层深度增加而减少的特征, 但不同植被恢复模式 SOC 含量减少的幅度不同。这是因为林分类型对凋落物产量和分解速率均有显著影响, 进而造成其土壤有机碳存在差异(聂浩亮等, 2020)。SOC 密度的变化规律与 SOC 含量基本一致, 二者呈现出极显著正相关关系 ($r=0.978$, $p < 0.01$, 皮尔逊双尾检验)。

4 结 论

江西省退化红壤植被恢复国家长期科研基地 0~40 cm 土层有机碳储量为 7317.87 Mg C, 其中有机碳含量为 17.57 g/kg, 有机碳密度为 85.87 Mg C/hm², 显著高于其他红壤侵蚀区, 说明试验区植被恢复取得了巨大成功。对比自然恢复地, 6种人工植被恢复模式的 SOC 含量均显著增加 ($p < 0.05$), 说明人工植被恢复效果显著, 可以在当地继续推广。在不同人工植被恢复模式之间 0~20 cm 土层的 SOC 含量也存在显著差异 ($p < 0.05$), 表现为木荷纯林 > 湿地松木荷混交林 > 湿地松补植木荷 > 马尾松补植木荷 > 湿地松纯林 > 马尾松纯林, 20~40 cm 土层的 SOC 含量则无显著差异。研究区 7 种植物恢复模式不同土层的土壤有机碳含量分布规律基本一致, 均表现出较强的表聚效应。SOC 密度的变化规律与 SOC 含量基本一致, 土壤含水率、容重、孔隙度和全氮对土壤有机碳有显著影响。人工植被恢复与重建在红壤侵蚀区效果显著, 在研究区今后的建设中应优先选择木荷等优势树种进而增强土壤固碳能力。

参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
(Bao S D. 2000. Soil Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press. [in Chinese])
陈美玲, 赵友朋, 张金池, 等, 2022. 凤阳山典型林分土壤有机碳特征[J]. 东北林业大学学报. 50(10): 69-75.
(CHEN M L, ZHAO Y P, ZHANG J C, et al. Soil Organic Carbon Characteristics of Different Forest Types in Fengyang Mountain[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(10): 69-75. [in Chinese].)
邓翠, 吕茂奎, 曾敏, 等, 2017. 红壤侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳组分变化[J]. 水土保持学报. 31(04): 178-183.
(DENG C, LU M-K, ZENG M, et al. Dynamics of Soil Organic Carbon Fractions with the Restoration Process of Pinus massoniana Plantation in Eroded Red Soil Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 178-183. [in Chinese].)

- 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, 等, 2018. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. 植物生态学报. 42(05): 595-608.
- (Gu X, Zhang S J, Liu Z D, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon concentration and density in the mid-subtropical region of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(05): 595-608. [in Chinese].)
- 李燕燕, 刘亮英, 吴春生, 等, 2020. 亚热带红壤区不同植被恢复类型土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 特征[J]. 核农学报. 34(11): 2561-2568.
- (LI Y Y, LIU L Y, WU C S, et al. $\delta^{13}\text{C}$ Characteristic of Soil Organic Carbon Under Different Vegetation Restoration in Subtropical Red Soil Region [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(11): 2561-2568. [in Chinese].)
- 李瑾璞, 于秀波, 夏少霞, 等, 2020. 白洋淀湿地地区土壤有机碳密度及储量的空间分布特征[J]. 生态学报. 40(24): 8928-8935.
- (LI J P, YU X B, XIA S X, et al. The spatial distribution of soil organic carbon density and carbon storage in Baiyangdian wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 8928-8935. [in Chinese].)
- 梁音, 杨轩, 潘贤章, 等, 2008. 南方红壤丘陵区水土流失特点及防治对策[J]. 中国水土保持. (12): 50-53.
- (LIANG Y, YANG X, PAN X Z, et al. Characteristics of soil erosion in southern red soil hilly areas and countermeasures for prevention and control[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12): 50-53. [in Chinese].)
- 刘苑秋, 杜天真, 郭晓敏, 等, 2004. 退化第四纪红粘土重建森林模式及其土壤恢复研究[J]. 水土保持学报. (06): 34-37.
- (LIU Y Q, DU T Z, GUO X M, et al. Study on Rehabilitating Forest Model and Soil Restoration on Degraded Quaternary Red Soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004(6): 34-37. [in Chinese].)
- 刘政, 许文斌, 田地, 等, 2019. 南方红壤严重侵蚀地不同恢复年限马尾松人工林生态系统碳储量特征[J]. 水土保持通报. 39(01): 37-42.
- (LIU Z, XU W B, TIAN D, et al. Characteristics of Ecosystem Carbon Stocks in Pinus Massoniana Plantations with Different Restoration Age on Severely Eroded Red Soils in Southern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(01): 37-42. [in Chinese].)
- 聂浩亮, 薄慧娟, 张润哲, 等, 2020. 北京海坨山典型林分土壤有机碳含量及有机碳密度垂直分布特征[J]. 林业科学研究. 33(6): 155-162.
- 区晓琳, 陈志彪, 陈志强, 等, 2018. 亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J]. 土壤学报. 55(05): 1156-1167.
- (QU X L, CHEN Z B, CHEN Z Q, et al. Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Subtropical Eroded Red Soil under Vegetation Restoration[J]. ACTA PEDOLOGICA SINICA, 2018, 55(5): 1156-1167. [in Chinese].)
- 王振鹏, 陈金磊, 李尚益, 等, 2020. 湘中丘陵区不同恢复阶段森林生态系统的碳储量特征[J]. 林业科学. 56(05): 19-28.
- (WANG Z P, CHEN J L, LI S Y, et al. Characteristics of Forest Ecosystem Carbon Stocks at Different Vegetation Restoration Stages in Hilly Area of Central Hunan Province, China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(5): 19-28. [in Chinese].)
- 王志齐, 杜兰兰, 赵慢, 等, 2016. 黄土区不同退耕方式下土壤碳氮的差异及其影响因素[J]. 应用生态学报. 27(03): 716-722.
- (WANG Z Q, DULL, ZHAO M, et al. Differences in soil organic carbon and total nitrogen and their impact factors under different restoration patterns in the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 716-722. [in Chinese].)
- 王勇辉, 焦黎, 2016. 艾比湖湿地土壤有机碳及储量空间分布特征[J]. 生态学报. 36(18): 5893-5901.
- (Wang Y H, Jiao L. The characteristics and storage of soil organic carbon in the Ebinur lake wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5893-5901. [in Chinese].)
- 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 等, 2006. 植被恢复对侵蚀退化红壤碳吸存的影响[J]. 水土保持学报. (06): 95-98+123.
- (XIE J S, YANG Y S, XIE M S, et al. Effects of Vegetation Restoration on Carbon Sequestration in Degraded Red Soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006(6): 95-98+123. [in Chinese].)
- 许婷婷, 董智, 郭建英, 等, 2022. 放牧对内蒙古典型草原植物群落特征与土壤有机碳的影响[J]. 草地学报. 30(09): 2273-2279.
- (XU T T, DONG Z, GUO J Y, et al. Effects of Grazing on Plant Community and Soil Organic Carbon in the Typical Steppe of Inner Mongolia, China[J]. Acta Agraria Sinica, 2022, 30(9): 2273-2279. [in Chinese].)

- 袁星明, 朱宁华, 郭耆, 等, 2022. 南亚热带不同人工林对土壤理化性质的影响及土壤质量评价[J]. 林业科学研究. 35(3): 112-122.
- 张浩, 吕茂奎, 江军, 等, 2016. 侵蚀红壤区植被恢复对表层与深层土壤有机碳矿化的影响[J]. 水土保持学报. 30(01): 244-249+314.
- (ZHANG H, LU M-K, JIANG J, et al. Effect of Vegetation Restoration on Topsoil and Subsoil Organic Carbon Mineralization in Red Soil Erosion Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(01): 244-249+314. [in Chinese].)
- 张杰, 张海燕, 赵姣, 等, 2018. 樟树人工林对湘东退化红壤性质及微生物碳源利用的影响[J]. 水土保持学报. 32(06): 333-339+345.
- (ZHANG J, ZHANG H-Y, ZHAO J, et al. Effects of Cinnamomum Camphora Plantations on Properties of Degraded Red Soil and Utilization of Microbial Carbon Sources in Eastern Hunan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 333-339+345. [in Chinese].)
- 赵元, 张伟, 胡培雷, 等, 2021. 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[J]. 生态学报. 41(21): 8535-8544.
- (Zhao Y, Zhang W, Hu P L, et al. Responses of soil organic carbon fractions to different vegetation restoration in a typical karst depression [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21) : 8535-8544. [in Chinese].)
- Bastin J-F, Finegold Y, Garcia C, et al., 2019. The global tree restoration Potential[J]. Science. 365(6448): 76-79.
- Canadell J G, Mooney H A, Baldocchi D D, et al., 2000. Commentary: Carbon Metabolism of the Terrestrial Biosphere: A Multitechnique Approach for Improved Understanding[J]. Ecosystems. 3(2): 115-130. DOI:10.1007/s100210000014.
- Chen Y, Yu S, Liu S, et al., 2017. Reforestation makes a minor contribution to soil carbon accumulation in the short term: Evidence from four subtropical Plantations[J]. Forest Ecology and Management. 384: 400-405.
- Deng L, Liu G-B, Shangguan Z-P, 2014. Land-Use Conversion and Changing Soil Carbon Stocks in China's 《Grain-for-Green》 Program: A Synthesis[J]. Global Change Biology. 20(11): 3544-3556.
- Deng L, Wang K-B, Chen M-L, et al., 2013. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China[J]. CATENA. 110: 1-7.
- Deng L, Wang K, Tang Z, et al., 2016. Soil organic carbon dynamics following natural vegetation restoration: Evidence from stable carbon isotopes ($\Delta^{13}C$) [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment. 221: 235-244.
- Dong W, Yu L, Gao-Lin W, et al., 2015. Effect of Rest-grazing management on soil water and carbon storage in an arid grassland (China)[J]. Journal of Hydrology. 527: 754-760.
- Du X, Liu C, Yu X, et al., 2008. Effects of shading on early growth of *Cyclobalanopsis glauca* (Fagaceae) in subtropical abandoned fields: Implications for vegetation Restoration[J]. Acta Oecologica. 33(2): 154-161.
- Laganière J, Angers D A, Paré D, 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-Analysis[J]. Global Change Biology. 16(1): 439-453.
- Li D, Niu S, Luo Y, 2012. Global Patterns of the Dynamics of Soil Carbon and Nitrogen Stocks Following Afforestation: A Meta-Analysis[J]. New Phytologist. 195(1): 172-181.
- Rong G, Li W, Zhu H, et al., 2020. Dynamics of New- and old- organic carbon and nitrogen in bulk soils and aggregates following afforestation on Farmland[J]. CATENA. 195: 104838.
- Soucémariadin LN, Cécillon L, Guenet B, et al., 2018. Environmental factors controlling soil organic carbon stability in French forest Soils[J]. Plant and Soil. 426(1-2): 267-286.
- Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al., 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic Carbon[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment. 164: 80-99.
- Van der Werf G R, Morton D C, DeFries R S, et al., 2009. CO₂ emissions from forest Loss[J]. Nature Geoscience. 2(11): 737-738.
- Van Straaten O, Corre M D, Wolf K, et al., 2015. Conversion of lowland tropical forests to tree cash crop plantations loses up to One-half of stored soil organic Carbon[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences. 112(32): 9956-9960.
- Wang B, Xue S, Liu G B, et al., 2012. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China[J]. CATENA. 92: 186-195.

- Wei X, Li Q, Liu Y, et al., 2013. Restoring ecosystem carbon sequestration through afforestation: A sub-tropic restoration case Study[J]. *Forest Ecology and Management*. 300: 60-67.
- Xiao K, He T, Chen H, et al., 2017. Impacts of vegetation restoration strategies on soil organic carbon and nitrogen dynamics in a karst area, southwest China[J]. *Ecological Engineering*. 101: 247-254.
- Xiao S, Zhang J, Duan J, et al., 2020. Soil Organic Carbon Sequestration and Active Carbon Component Changes Following Different Vegetation Restoration Ages on Severely Eroded Red Soils in Subtropical China[J]. *Forests*. 11(12): 1304.
- Xiao L, Zhang W, Hu P, et al., 2021. The Formation of Large Macroaggregates Induces Soil Organic Carbon Sequestration in Short-Term Cropland Restoration in a Typical Karst Area[J]. *Science of the Total Environment*. 801: 149588.
- Zhao Y-G, Liu X-F, Wang Z-L, et al., 2015. Soil organic carbon fractions and sequestration across a 150-yr secondary forest chronosequence on the Loess Plateau, China[J]. *CATENA*. 133: 303-308.