

不同退耕还林年限下桉树人工林土壤有机碳组分 $\delta^{13}\text{C}$ 特征^①

张 天, 潘扬鑫, 吴丽雪, 付 越, 孙婷婷*

(广西大学农学院/广西农业环境与农产品安全重点实验室, 南宁 530000)

摘 要: 为探讨退耕还林对土壤有机碳(SOC)及其组分含量和相互转化的影响, 基于稳定碳同位素自然丰度($\delta^{13}\text{C}$), 以不同退耕还林年限(1、3、4、10 a)桉树林为研究对象, 以耕地(退耕还林 0 a)为对照, 分析了颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC)的含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化, 并量化了碳组分之间的碳流路径。结果表明: 退耕还林显著提升了 SOC 含量, 短期恢复(退耕还林 1 a)后, SOC 含量增加 104.2%, 其中 POC 和 MAOC 含量分别增加 56.2% 和 189.0%; 长期恢复阶段(退耕还林 10 a), SOC 增幅达到 124.7%, POC 增幅进一步扩大至 110.5%, MAOC 含量与退耕还林 1 a 时相近, 三者呈现同步增长趋势($P<0.05$)。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$ 逐渐降低, 表明退耕还林减缓了 SOC 分解。碳流路径在退耕还林 1 a 土壤中表现为从 MAOC 到 POC, 在退耕还林 3~10 a 土壤中则从 POC 到 MAOC, 且碳流动强度先增后减, 退耕还林 4 a 时达到峰值。相关分析显示, SOC 及其组分与 pH 和全氮(TN)呈显著正相关, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 与土壤含水量(SWC)呈显著正相关, 而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$ 与 SWC、SOC 和 TN 呈显著负相关, 揭示了退耕还林背景下 SOC 动态与土壤理化性质之间的密切关系。总体上, 退耕还林显著增加 SOC 含量, 降低 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 减缓 SOC 周转速率, 从而提升土壤碳储量。

关键词: 退耕还林年限; 土壤有机碳; 有机碳组分; ^{13}C 自然丰度

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ in Soil Organic Carbon Components of Eucalyptus Plantations Under Different Restoration Durations After Returning Farmland to Forest

ZHANG Tian, PAN Yangxin, WU Lixue, FU Yue, SUN Tingting*

(College of Agriculture, Guangxi University/Guangxi Key Laboratory of Agricultural Environment and Agricultural Product Safety, Nanning 530000, China)

Abstract: To investigate the effects of the Grain for Green Program (converting farmland to forests) on soil organic carbon (SOC) dynamics, including the content and interconversion of its fractions, a study was conducted based on natural abundance of stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$). *Eucalyptus* plantations with different restoration durations (1, 3, 4, and 10 years) were studied, with a cropland (0 year) serving as the control. The changes in the content and $\delta^{13}\text{C}$ values of particulate organic carbon (POC) and mineral-associated organic carbon (MAOC) were analyzed and the carbon flow pathways between these fractions were quantified. The results showed that forest restoration significantly increased SOC content. After short-term restoration (1 year), the SOC content increased by 104.2%, with POC and MAOC increasing by 56.2% and 189.0%, respectively. In the long term (10 years), the SOC increase reached 124.7%, and the POC increase further expanded to 110.5%. The MAOC content was similar to that at the 1-year stage, with all three pools showing a synchronous increasing trend ($P<0.05$). The decreases in $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$ indicated that forest restoration slowed SOC decomposition. The carbon flow pathway shifted from MAOC to POC in 1-year restored soil, and from POC to MAOC in soils restored for 3–10 years. The carbon flow intensity increased initially and then decreased, peaking at the 4-year mark. Correlation analysis revealed significant positive correlations between SOC (and its fractions) with soil pH and total nitrogen (TN). $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ was significantly positively correlated with soil water content (SWC), whereas $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$ was significantly negatively correlated with SWC, SOC, and TN. These correlations highlight the close relationships between SOC dynamics and soil physicochemical properties following farmland-to-forest conversion. In conclusion,

①基金项目: 广西自然科学基金项目(2025GXNSFBA069347)和广西大学人才引进——助理教授科研启动经费项目(A3310051077)资助。

* 通信作者(ttsun9@gxu.edu.cn)

作者简介: 张天(2000—), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳循环方面的研究。E-mail: zt21400s@163.com

the conversion of farmland to forest significantly enhances soil carbon storage by increasing SOC content, reducing $\delta^{13}\text{C}$ values, and slowing the SOC turnover rate.

Key words: Duration of returning farmland to forest; Soil organic carbon; Organic carbon components; Natural abundance of ^{13}C

土壤有机碳(SOC)库是陆地碳库的主要组成部分,对陆地生态系统碳循环有着很重要的作用^[1]。SOC库的微小波动均会引起大气 CO_2 浓度的巨大变化^[2],进而影响全球气候变化。因此,探明SOC的形成、周转及稳定过程对提升土壤碳固存、改善全球气候具有重要意义。将SOC分为颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC)是研究土壤SOC动态的一个重要途径^[3]。POC直接来源于植物枯枝落叶,一定程度上可以表征活性有机碳,MAOC则是微生物残体与黏土矿物相结合而产生的有机碳,可以表征稳定的土壤碳库^[4]。研究POC和MAOC的动态变化,能够更准确地预测SOC对气候变化的响应。

退耕还林是提升土壤碳汇功能的重要措施,其通过植被恢复增强土壤对大气 CO_2 的固存能力,有效增加SOC储量^[5]。然而,SOC的动态变化并非线性过程,其组分(POC和MAOC)对退耕还林年限的响应呈现高度复杂性。研究表明,退耕初期(<5 a)因植被生产力低、土壤扰动加剧分解,POC和MAOC含量显著下降,而中长期退耕还林(>10 a)随凋落物输入增加和微生物-矿物相互作用增强,SOC逐步恢复甚至超越原有耕地水平^[6]。这一过程受树龄、土壤性质(pH、全氮)及人为管理因素的多重调控。例如,有研究发现,随林龄增加,杉木林土壤POC和MAOC含量持续上升^[7],水杉林土壤二者含量则呈先增后降趋势^[8],表明树龄可能通过改变碳输入与分解平衡驱动SOC组分动态变化。然而,现有研究对树龄阈值、多因子交互机制及人为管理干扰的影响仍缺乏系统解析,限制了对碳汇效应的精准评估。

稳定碳同位素分析技术可以指示SOC的来源及周转过程,是研究SOC动态的有力工具^[9]。利用 ^{13}C 自然丰度($\delta^{13}\text{C}$)值的变化可以揭示SOC在不同颗粒组分之间的流动方向、强度及稳定途径^[10]。然而,目前关于不同退耕还林年限下土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的研究较少,尤其是土壤碳流动方向、强度及其与土壤性质的关系尚未得到充分揭示。因此,本研究基于 $\delta^{13}\text{C}$ 技术,研究退耕还林后不同年限下土壤POC和MAOC含量变化及碳在二者之间的流动特征,并分析土壤性质对SOC的动态影响,以期退耕还林后SOC稳定性评价和土地管理措施制定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

供试桉树人工林位于广西壮族自治区崇左市扶绥县试验基地(107°39'18"E~107°41'12"E, 22°20'54"N~22°24'7"N)。该区域属于亚热带季风气候,年均气温22.1℃,年均降水量1110.7 mm。土壤类型为赤红壤,土壤母质为第四纪红黏土,土壤质地为黏性中壤土。植被以桉树人工林为主,耕地主要农作物为甘蔗。

1.2 试验设计

2023年7月在该试验基地内以耕地(退耕还林0 a)为对照,选取甘蔗地退耕还林后的不同年限桉树人工林(1、3、4、10 a)为研究对象,采用五点取样法,在每一样地采集0~20 cm土层深度的土壤样品约3 kg,混合均匀后剔除多余的石块和植物根系等肉眼可见的杂物,过2 mm筛后,将土壤分成两个部分,一部分保存于4℃冰箱用于测定硝态氮和有效磷等,另一部分经自然风干后用于测定土壤有机碳组分、全氮和全磷。

1.3 测定指标与方法

通过粒度分馏方法分离不同土壤组分^[11],即用50 g/L的六偏磷酸钠溶液与土壤混合(液土体积质量比5:1),振荡18 h后,将悬浮液过53 μm 筛,并反复冲洗直至溶液澄清,得筛上、下两部分土壤。经烘干、研磨并过100目筛,用重铬酸钾氧化-外加热法^[12]分别测定上述两个土壤组分的有机碳含量,>53 μm 组分中对应的为颗粒态有机碳(POC),<53 μm 组分中对应的为矿物结合态有机碳(MAOC)。

称取100~300 μg 过100目筛的上述两个土壤组分,利用同位素质谱仪IRMS (Elementar IsoPrime 100)测定 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$ ^[13]。

参考鲍士旦《土壤农化分析》第三版^[13]测定土壤基本理化性质:含水量(SWC)采用烘干法测定;pH采用土水质量比1:5 pH计测定;SOC采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定;全磷(TP)采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮-钼锑抗比色法测定;硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)采用KCl浸提-双波长比色法测定;有效磷(AP)采用0.5 mol/L NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理与分析

POC、MAOC 中 ^{13}C 同位素丰度计算公式如下：
$$\delta^{13}\text{C} = [(R_{\text{SA}} - R_{\text{ST}}) / R_{\text{ST}}] \times 1000 \quad (1)$$

式中： $\delta^{13}\text{C}$ 代表 ^{13}C 同位素丰度(‰)； R_{SA} 和 R_{ST} 分别代表样品和标准物质的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ，碳同位素标准物质来自美国南卡罗来纳州白垩系皮狄组地层中的美洲拟箭石^[14]($R=1.11\%$)。

不同碳组分中 $\delta^{13}\text{C}$ 值与凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异($\Delta^{13}\text{C}$)反映了 SOC 组分同位素组成的变化，计算如下：

$$\Delta^{13}\text{C} = \delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2 \quad (2)$$

式中： $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 POC 或 MAOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)； $\delta^{13}\text{C}_2$ 为凋落物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)。

文中所有数据均运用 SPSS 19 软件进行统计分析，其中，不同退耕还林年限间的差异通过单因素方

差分析(One-way ANOVA)和 LSD 多重比较法检验，显著性水平为 $P<0.05$ ；采用 Person 法对土壤理化性质、SOC 组分及其 $\delta^{13}\text{C}$ 进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

由表 1 可知，与耕地(退耕还林 0 a)相比，退耕还林 1 a 和 10 a 显著提高了土壤 pH 和 TN 含量，但退耕还林 3 a 和 4 a 显著降低了土壤 pH 和 TN 含量；退耕还林 10 a 显著提高了土壤 SOC 和 TP 含量；退耕还林 1~4 a 显著降低了土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量，但退耕还林 10 a 与耕地持平；退耕还林 3 a 开始显著降低了 AP 含量。

表 1 不同退耕还林年限土壤理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties under different years of returning farmland to forest

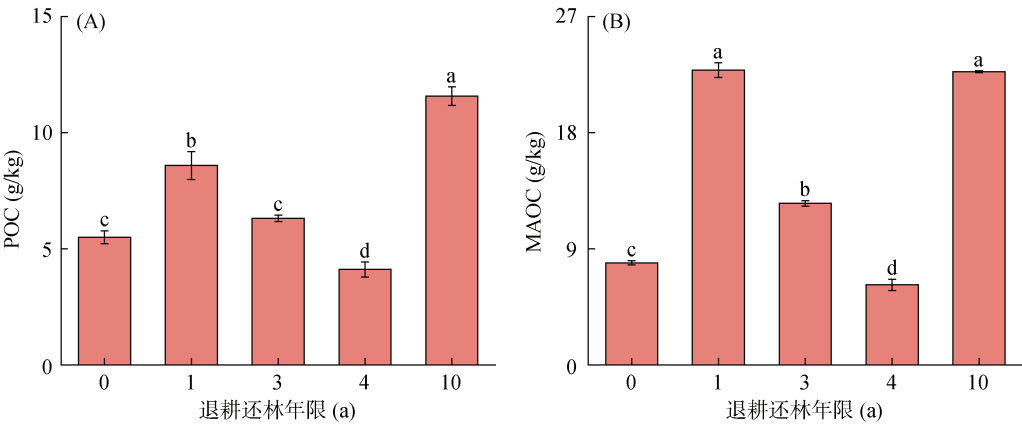
退耕还林年限(a)	SWC(%)	pH	SOC(g/kg)	TN(g/kg)	TP(g/kg)	$\text{NO}_3\text{-N}(\text{mg/kg})$	AP(mg/kg)
0	23.70±0.64b	5.01±0.43c	16.79±1.00d	1.89±0.02c	0.64±0.01c	70.29±7.99a	29.47±1.39b
1	30.08±0.88a	5.58±0.84b	34.29±1.42b	2.49±0.04b	0.78±0.03bc	39.85±2.74b	37.94±1.01a
3	20.23±0.34c	4.74±0.12d	20.18±0.34c	1.52±0.03d	0.77±0.06bc	15.35±1.50c	17.84±1.84c
4	18.48±0.61c	5.15±0.45c	12.39±0.30e	1.03±0.01e	1.18±0.08a	13.52±2.69c	32.12±1.23b
10	20.20±0.45c	6.16±0.55a	37.71±0.53a	2.61±0.01a	0.89±0.08b	58.58±6.23a	15.59±2.56c

注：表中数据为均值±标准误；同列数据后不同小写字母表示不同退耕还林年限间差异显著($P<0.05$)。

2.2 土壤有机碳组分含量

与耕地相比，退耕还林 1 a 和 10 a 显著增加了土壤 POC 含量，分别增加了 56.2% 和 110.5%，退耕还林 4 a 显著降低了 POC 含量 25.2%；退耕还林 1~4 a 内，随着退耕还林年限的增加，POC 含量显著降低，但退耕还林 10 a 显著增加，且显著高于其他年限(图 1A)。

与耕地相比，土壤 MAOC 变化趋势与 POC 一致，不仅退耕还林 1 a(189.0%)和 10 a(187.3%)土壤 MAOC 含量显著增加，退耕还林 3 a 其含量也显著增加了 58.3%，但退耕还林 4 a 显著降低了 MAOC 含量 21.5%。另外，退耕还林 1~4 a 内，MAOC 与 POC 含量有着相同的变化趋势(图 1B)，且 MAOC 含量高于 POC 含量。



(图中不同小写字母表示不同退耕还林年限之间差异显著($P<0.05$)；下同)

图 1 不同退耕还林年限土壤有机碳组分变化

Fig. 1 Changes in SOC components under different years of returning farmland to forest

2.3 土壤有机碳组分 $\delta^{13}\text{C}$ 值

不同退耕还林年限土壤颗粒态有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$) 变化范围为 $-22.32\text{‰} \sim -13.65\text{‰}$, 退耕还林 1 a 达到最大值 (-13.65‰), 显著高于耕地和其他退耕还林年限, 且随着退耕还林年限的增加而显著降低, 退耕还林 10 a 最低 (-22.32‰), 显著低于其他退耕还林年限 (图 2A)。

矿物结合态有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$) 变化范围为 $-31.97\text{‰} \sim -14.90\text{‰}$, 退耕还林 1 a 达到最小值 (-31.97‰), 显著低于耕地和其他退耕还林年限, 退耕还林 3 a 与耕地保持一致, 且显著高于其他年限, 但在退耕还林 4 a 后随着退耕还林年限的增加而显著

降低 (图 2B)。

2.4 土壤有机碳组分的碳流动

图 3 显示了不同退耕还林年限 SOC 组分之间碳的流动路径及强度。从图 3 中可知, 耕地土壤碳从 POC 流向 MAOC, 概率值为 1.17, 退耕还林 1 a 土壤碳是从 MAOC 向 POC 流动, 其概率值为 18.33, 而在退耕还林 3 a 后, 土壤碳的流动方向总是从 POC 流向 MAOC。退耕还林 3~4 a, 碳流概率逐渐增大, 从退耕还林 3 a 的 1.87 增加到了退耕还林 4 a 的 0.86, 表明随着退耕还林年限的增加, 土壤碳从大颗粒向小颗粒流动的强度增加。但在退耕还林 10 a 后其概率变小, 概率值为 4.64, 大于退耕还林 1 a。

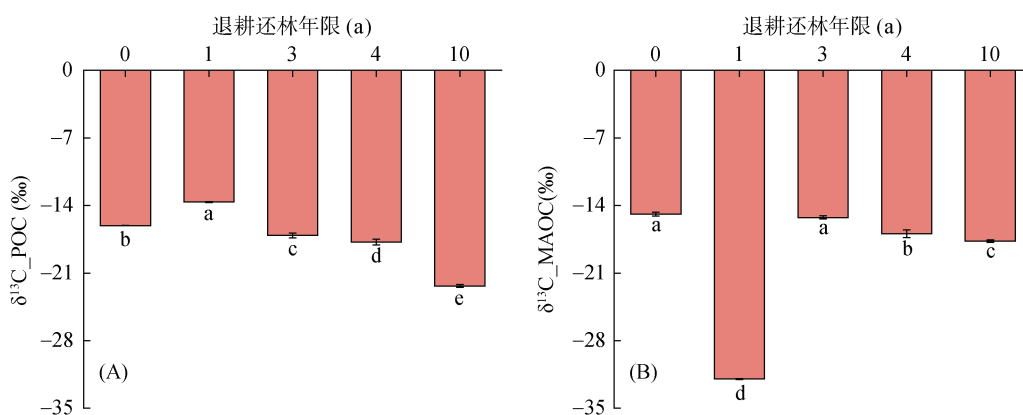
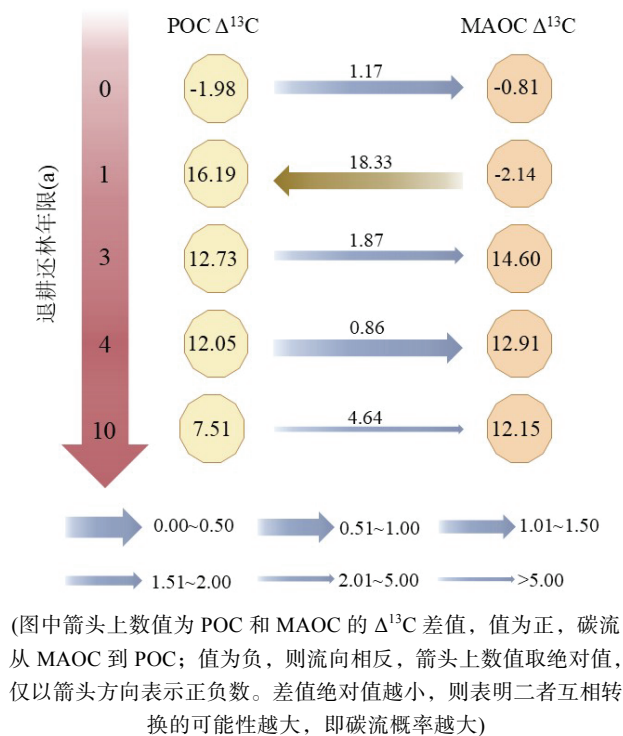


图 2 不同退耕还林年限土壤有机碳组分 $\delta^{13}\text{C}$ 变化

Fig. 2 Changes in SOC composition $\delta^{13}\text{C}$ under different years of returning farmland to forest



(图中箭头上数值为 POC 和 MAOC 的 $\Delta^{13}\text{C}$ 差值, 值为正, 碳流从 MAOC 到 POC; 值为负, 则流向相反, 箭头上数值取绝对值, 仅以箭头方向表示正负数。差值绝对值越小, 则表明二者互相转换的可能性越大, 即碳流概率越大)

图 3 不同退耕还林年限土壤碳的流动

Fig. 3 Flow of soil carbon in different years of returning farmland to forest

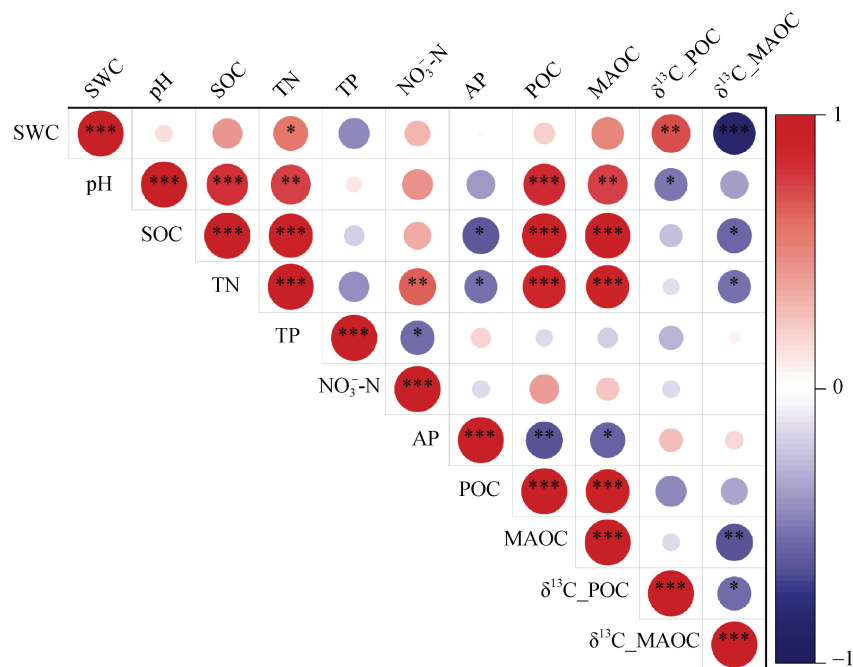
2.5 有机碳同位素丰度与土壤理化性质和碳组分的相关性

由图 4 可知, POC 和 MAOC 均与土壤 pH、SOC 和 TN 显著正相关 ($P < 0.01$), 与土壤 AP 显著负相关 ($P < 0.05$); $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 与 SWC 显著正相关 ($P < 0.01$), 与 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$); $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$ 与 SWC、SOC、TN、MAOC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 显著负相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 退耕还林对土壤有机碳组分的影响

本研究发现, 在退耕还林 1~4 a, POC 和 MAOC 含量均显著降低 ($P < 0.05$), 年均降低幅度分别为 17.4% 和 24.3%, 至退耕还林 10 a 才显著高于其他年限。这与 Pual 等^[15]的研究结果一致: 造林前 5 a 表层土壤碳含量年均下降 3.46%, 30 a 后逐渐恢复。刘延惠等^[16]在宁夏六盘山的观测结果也支持这种先降后升的趋势。这一现象与退耕初期 (<5 a) 新植被生产力较低、有机质输入减少以及土壤扰动加速分解密切相关^[17]。值得注意的是, 土壤理化性质 (如 pH 和 TN) 对 SOC 动态具有重要调控作用。本研究结果显



(*、**和***分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平显著相关)

图 4 土壤理化性质与有机碳分级及其碳同位素丰度的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between soil physicochemical properties, organic carbon grading, and carbon isotope abundance

示, pH 和 TN 与 SOC、POC、MAOC 均呈显著正相关(图 4, $P<0.01$), 这可能与酸性土壤(pH 4.62~6.71)对微生物活性的抑制作用有关。在退耕初期, 土壤 pH 的轻微上升会促进微生物活动, 加速 SOC 分解, 导致碳含量下降^[18]。同样地, 土壤 TN 也会通过影响微生物的活动来影响 SOC 的分解^[19]。

耕地因施肥维持 SOC 稳定, 而退耕后有机肥输入中断, 新生树种凋落物量低于农作物残留, 加剧 SOC 损失^[20-21]。本研究中, 退耕还林 4 a 后土壤 POC、MAOC 含量低于耕地, 与此吻合。但退耕还林 1 a 后 POC 及退耕还林 1、3 a 后 MAOC 含量显著高于耕地, 可能与广西桉树经济林的特殊管理有关, 即造林 2 a 后施用大量有机肥以促进速生, 这为初期 SOC 提供了额外输入源。

3.2 退耕还林对土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征及碳流动的影响

本研究结果显示, 随着退耕还林年限的增加, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$ 总体上呈现显著降低的趋势(图 2), 说明在植被恢复的过程中, SOC 的稳定性得到提升。这种现象可以从以下两个方面解释: 首先, 在 SOC 分解的过程中, 较轻的 ^{12}C 会先被分解转化为 CO_2 释放到大气中, 而较重的 ^{13}C 则在土壤中富集^[22]; 其次, $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$ 与 SOC、TN 呈显著负相关(图 4, $P<0.05$)。TN 的增加通过促进植物生长提高初级生产力, 增加有机质输入^[23], $\delta^{13}\text{C}$ 值随之降低。因此,

任何加速 SOC 周转的过程均会导致 ^{13}C 的富集^[24]。

为了预测 SOC 组分中碳的转化途径, 本文绘制了如图 3 所示的示意图, 结果发现, 退耕还林后 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 与植物最接近, 表明 POC 是碳流途径的起点, 也就是说, 颗粒较大的有机碳组分是“碳源”^[12]。这是因为 POC 主要是由植物凋落物、植物根系等组成, 在土壤中最先形成, 而后才被微生物分解^[25]。耕地转变为人工林后, 土壤碳流动的方向总是从 POC 流向 MAOC, 表明 POC 作为 SOC 的碳源, 通过微生物的分解和转化后, 将有机碳固定到粒径更小的 MAOC 中, 则 MAOC 充当 SOC 的碳汇, 并且能够在土壤中长期稳定存在。同时本研究还发现, 退耕还林后碳流动强度低于耕地, 这与 Bi 等^[26]的研究结果一致。造成该结果的原因是退耕还林后, 土壤结构并未从农田耕作中恢复过来, 削弱了对有机质分解的保护作用^[27], 即使有更多的有机碳输入, 也会导致退耕还林过程中碳损失增加^[26]。

4 结论

退耕还林有效地增加 SOC 含量, 在长期退耕还林后尤为显著。然而, 在短期退耕还林时, SOC 及其组分含量均随年限的增加而降低。随着退耕还林年限的增加, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAOC}}$ 均降低, 表明在此过程中 SOC 分解速率减小, 有利于 SOC 的积累。

SOC 组分间碳流分析表明, 退耕还林后微生物分解的有机质首先形成较大颗粒的 POC, 最终形成稳定的 MAOC 而长期保留在土壤中。总体上, 耕地转为林地后有利于 SOC 的稳定和积累。

参考文献:

- [1] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533–544.
- [2] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 80–99.
- [3] 谷俊, 杨飞, 李德成, 等. 祁连山区成土过程驱动的土壤地形序列土壤有机碳固存特征[J]. 土壤, 2023, 55(4): 871–879.
- [4] 马红亮, 陈灿灿, 尹云锋, 等. 森林土壤不同粒径颗粒的碳矿化研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1247–1259.
- [5] 衣鹏慧, 吴会峰, 胡保安, 等. 黄土高原地区退耕还林后土壤有机碳储量变化特征及影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10054–10064.
- [6] 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[J]. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3544–3556.
- [7] Wang Y, Chen L, Xiang W H, et al. Regulation of soil organic carbon dynamics by microbial communities during reforestation of Chinese fir plantations after clear-cutting[J]. Land Degradation & Development, 2024, 35(11): 3539–3551.
- [8] 翟宁宁, 石珂, 阮宏华, 等. 不同林龄水杉人工林土壤颗粒有机碳和矿物结合有机碳的变化特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2025, 49(3): 25–32.
- [9] 张芳超, 卢伟伟, 查全智. 标记停留时间对水稻及其生物质炭的 ^{13}C 和 ^{15}N 丰度的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 77–85.
- [10] 金鑫鑫, 汪景宽, 孙良杰, 等. 稳定 ^{13}C 同位素示踪技术在农田土壤碳循环和团聚体固碳研究中的应用进展[J]. 土壤, 2017, 49(2): 217–224.
- [11] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1367–1377.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] Xiao J J, Zhao Y F, Wang X, et al. Effects of recovery models on organic carbon pathways: A method using ^{13}C natural abundance[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 328: 107851.
- [14] 孙建飞, 戴崴巍, 贺同鑫, 等. 蒙古栎叶片及其土壤碳、氮同位素自然丰度对大气 CO_2 浓度升高的响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2179–2185.
- [15] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, et al. Change in soil carbon following afforestation[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1/2/3): 241–257.
- [16] 刘延惠, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山南部华北落叶松人工林土壤有机碳含量[J]. 林业科学, 2012, 48(12): 1–9.
- [17] 黄从德, 张健, 邓玉林, 等. 退耕还林地在植被恢复初期碳储量及分配格局研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 130–133.
- [18] 张金硕, 李素艳, 孙向阳, 等. 山东省不同植被类型土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 土壤, 2024, 56(2): 350–357.
- [19] Lu X F, Hou E Q, Guo J Y, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2021, 27(12): 2780–2792.
- [20] 白雪爽, 胡亚林, 曾德慧, 等. 半干旱沙区退耕还林对碳储量和分配格局的影响[J]. 生态学报, 2008, 27(10): 1647–1652.
- [21] 闫清华, 张凤华, 谭斌, 等. 不同恢复年限对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1183–1190.
- [22] Werth M, Kuzyakov Y. ^{13}C fractionation at the root–microorganisms–soil interface: A review and outlook for partitioning studies[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(9): 1372–1384.
- [23] Field C D, Evans C D, Dise N B, et al. Long-term nitrogen deposition increases heathland carbon sequestration[J]. Science of The Total Environment, 2017, 592: 426–435.
- [24] De Clercq T, Heiling M, Dercon G, et al. Predicting soil organic matter stability in agricultural fields through carbon and nitrogen stable isotopes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 88: 29–38.
- [25] Li Y, Buckeridge K, Wang B R, et al. Glucoproteins in particulate and mineral-associated organic matter pools during grassland restoration[J]. Catena, 2024, 247: 108480.
- [26] Bi Y L, Li M C, Christie P, et al. Evaluating carbon dynamics in soil aggregates using $\delta^{13}\text{C}$ following long-term vegetation restoration near a surface mine in a semi-arid region[J]. Catena, 2023, 231: 107281.
- [27] Wick A F, Ingram L J, Stahl P D. Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(2): 201–209.

(责任编辑: 于 飞)