

DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.202505014

油松人工林恢复过程中针叶-枯落物-土壤系统的碳同位素动态特征

岳军伟^{1,2}, 朱丝琦¹, 雷雯婕¹, 彭晓邦²

(1. 商洛学院城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛 726000;

2. 商洛市碳中和工程技术研究中心, 陕西 商洛 726000)

摘要: 为揭示亚热带-暖温带过渡区油松人工林植被恢复过程中碳积累与分配的动态变化规律, 以秦岭南麓油松人工林的中龄林和幼龄林为研究对象, 并以草地作为对照, 分析这3种植被类型中针叶-枯落物-土壤系统的有机碳含量及碳稳定同位素相对丰度(δ_{13C})的差异。结果表明: (1) 油松幼龄林针叶有机碳含量显著高于油松中龄林, 但两者 δ_{13C} 无显著差异。3种植被类型中, 枯落物的有机碳含量和 δ_{13C} 均无显著差异。(2) 在0~30 cm土壤深度范围内, 土壤有机碳含量(C)随土壤深度增加而减小, 油松中龄林及草地土壤有机碳含量平均值均高于油松幼龄林。土壤 δ_{13C} 整体上表现为油松幼龄林>油松中龄林>草地, 且随土壤深度增加而逐渐增大, 但不同土层间无显著差异。(3) 土壤 δ_{13C} 与lg C呈显著负相关($P<0.05$); 3种植被类型土壤碳周转速率依次为草地>油松幼龄林>油松中龄林。(4) 不同土层 δ_{13C} 之间呈显著正相关($P<0.05$); 土壤(0~20 cm) δ_{13C} 与枯落物 δ_{13C} 呈显著负相关($P<0.05$), 但与针叶的 δ_{13C} 无显著相关关系。

关键词: 油松林; 草地; 针叶; 枯落物; 土壤有机碳; 碳稳定同位素相对丰度

中图分类号: S714.5

文献标志码: A

文章编号: 2096-0018(2025)06-0579-09



开放科学标识码
(OSID 码)

Dynamics characteristics of carbon isotopes in needles, litter, and soil system during the restoration of *Pinus tabulaeformis* plantations

YUE Junwei^{1,2}, ZHU Siqi¹, LEI Wenjie¹, PENG Xiaobang²

(1. School of Urban and Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

2. Shangluo Carbon Neutrality Engineering Technology Research Center, Shangluo, Shaanxi 726000, China)

Abstract: To reveal the dynamic patterns of carbon accumulation and allocation during the vegetation restoration process of *Pinus tabulaeformis* plantations at the subtropical to warm temperate transitional zone, this study focused on young and middle-aged *Pinus tabulaeformis* plantations in the southern Qinling Mountains, with grassland serving as the control. The variations in content of organic carbon and relative abundance of the stable carbon isotope (δ_{13C}) within the needle-litter-soil continuum were analyzed across these three vegetation types. The results showed that: (1) The content of organic carbon in the needles of the young forest was significantly higher than that of the middle-aged stand. However, there was no significant difference in δ_{13C} of the needles between young and middle-aged forests. Furthermore, neither the content of organic carbon nor δ_{13C} in the litter layer differed significantly across the three vegetation types. (2) Within the soil depth range of 0-30 cm, the organic carbon content (C) decreased with the increase in soil depth, and the average organic carbon content of both the middle-aged forest and the grassland was higher than that of the young forest. Soil δ_{13C} showed a pattern of young forest > middle-aged forest > grassland. δ_{13C} gradually increased as the soil depth increased but had no significant differences among different soil layers. (3) Soil δ_{13C} exhibited a negative correlation with lg C ($P<0.05$), and the soil carbon turnover rates of the three vegetation types followed the order of grassland > young forest > middle-aged forest. (4) δ_{13C} exhibited positive correlations across various soil layers ($P<0.05$). δ_{13C} in the 0-20 cm soil layer showed a negative correlation with that in the litter ($P<0.05$) but no significant correlation with that in needles.

Key words: *Pinus tabulaeformis* plantation; grassland; needles; litter; soil organic carbon; relative abundance of stable carbon isotopes (δ_{13C})

收稿日期: 2025-05-22 修回日期: 2025-08-10

基金项目: 陕西省教育厅青年创新团队科学研究计划项目“秦岭南麓不同林龄油松人工林土壤呼吸对凋落物输入变化的响应”(23JP041); 商洛学院大学生创新创业训练计划项目“秦岭南麓油松林土壤呼吸对凋落物输入变化的响应”(S202411396063)。

第一作者简介: 岳军伟(1982-), 男, 讲师, 博士, 从事森林碳汇及植被恢复研究。Email: yjw988173@163.com。

通信作者: 彭晓邦(1980-), 男, 教授, 从事生态学和生态系统调控领域研究。Email: xbpeng1898@163.com。

森林恢复作为改造退化生态系统的关键手段,其生态效益体现在多个维度:一方面,通过植被枯落物分解及根系生理活动,可增强土壤养分循环与有机碳输入,同时优化土壤微生物群落结构;另一方面,通过植被生长与群落构建,可改善土壤结构,提高土壤固碳能力并遏制退化进程^[1]。从碳汇功能的视角看,不同森林类型的固碳能力和碳储量差异显著, XU *et al.*^[2]对中国北方过渡带研究发现,针阔混交林碳储量最高,其次为针叶林和阔叶林。土壤碳库随恢复时间呈现阶段性变化:草地恢复初期(5~10 a)土壤有机碳含量上升较快,但长期(大于20 a)趋于稳定;而阔叶林和针叶林土壤碳储量在30 a后趋于稳定,并随持续时间增加略有下降;混交林和阔叶林的土壤碳积累优于针叶林^[3]。在碳储量分配方面,随演替进行,植被碳储量贡献不断增大,而土壤碳储量贡献在减小^[4]。不同植被类型在不同恢复阶段的固碳动态和碳分配情况表现各异,深入研究森林恢复过程中生态系统碳循环动态变化,有助于精确评价森林生态系统固碳潜力。

生态系统的碳稳定同位素特征能够反映碳循环中光合作用、呼吸作用等关键过程,可有效表征碳循环的动力学机制及其演变规律^[5],为揭示植被-枯落物-土壤系统的碳动态演化提供了重要研究手段。叶片通过光合作用将无机碳(CO₂)转化为有机碳,是地球碳循环的基础环节,其碳稳定同位素相对丰度(relative abundance of carbon stable isotopes, δ_{13C})反映了水分利用效率和环境适应性;枯落物分解过程中,微生物对轻同位素(¹²C)的优先利用导致残留物中¹³C富集,而土壤 δ_{13C} 反映了有机质输入状况^[6],记录了新旧碳混合与周转的长期信息^[7]。现有研究表明,土壤 δ_{13C} 随土壤深度增加呈上升趋势,这种垂直分布特征与土壤有机碳的同位素分馏效应密切相关,同时,植物叶片、枯落物与土壤的 δ_{13C} 均存在同位素分馏现象,这些特征可作为生态系统有机碳动态变化的重要证据^[8]。现有研究多聚焦单一组分(如叶片或土壤)的 δ_{13C} 特征^[9],或针对单一生态系统类型^[10],难以揭示植被类型转换(如草地→森林)对碳循环过程的系统性影响。因此,研究生态系统中叶片-枯落物-土壤系统的 δ_{13C} 变化模式,能够揭示不同时空尺度下有机碳的周转速率、稳定化机制及其对气候变化的响应规律,为陆地生态系统碳汇功能评估提供参考资料。

秦岭是全球生物多样性研究的热点地区之一,具有丰富的森林资源,植被覆盖度约90%,蕴含着巨大的碳汇潜力^[11]。YAO *et al.*^[12]的研究表明,秦岭-大巴山地区作为南北过渡带,其植被动态变化对气候变化和土地利用政策响应敏感,退耕还林工程有效保护了这一区域的生物多样性。秦岭南麓作为汉江、嘉陵江与丹江的发源地,也是南水北调中线工程的重要水源涵养区,因退耕还林工程的实施,本区存在大面积人工营建的油松林。这些林分目前大多为幼龄林和中龄林,两者在物种组成、林下枯落物厚度上有明显差异,但从碳稳定同位素角度分析两者在碳循环及周转方面差异的研究较少,对人工造林形成的油松林与造林前的地类对比研究更为少见。本研究以秦岭南麓的油松人工林(中龄林和幼龄林)及毗邻的草地为对象,通过研究这3种植被类型针叶-枯落物-土壤系统有机碳含量和碳稳定同位素相对丰度的动态变化,分析 δ_{13C} 和土壤有机碳含量间的耦合关系,旨在揭示亚热带与暖温带过渡区油松人工林植被恢复过程中碳积累与周转的长期动态变化规律。研究结果对深入理解植被恢复过程中土壤固碳的长期效应具有重要意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于商洛市区北部的金凤山及毗邻区,处在丹江上游,森林覆盖率达到75%,主要树种为栓皮栎(*Quercus variabilis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*),海拔700~950 m。本区以暖温带半湿润季风气候为主,多年平均年降水量约700 mm,年平均气温12.8℃,呈现出四季分明、雨热同期的气候特征,土壤以黄棕壤、棕壤为主,呈酸性或微酸性^[12]。经查询当地林业部门档案资料,本区的油松人工林,林龄分别为15 a和28 a,均源于弃耕地造林。依据国家林业局颁布的《主要树种龄级与龄组划分:LY/T 2908—2017》^[13]中油松人工林龄组划分标准,≤20 a为幼龄林,(20 a, 30 a]为中龄林,本研究中的油松林分别为幼龄林和中龄林。油松中龄林中主要植被有油松、栓皮栎、女贞

(*Ligustrum lucidum*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、忍冬(*Lonicera japonica*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、糙叶树(*Aphananthe aspera*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)、薄叶鼠李(*Rhamnus leptophylla*)、苘草(*Arthraxon hispidus*)、三脉紫菀(*Aster ageratoides*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、千里光(*Senecio scandens*)、紫堇(*Corydalis edulis*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)、早落通泉草(*Mazus caducifer*)。油松幼龄林中主要植被有大白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)、刺儿菜(*Cirsium setosum*)、艾(*Artemisia argyi*)、金丝草(*Pogonatherum crinitum*)。草地主要植被为苘草(*Arthraxon hispidus*)和刺儿菜(*Cirsium setosum*)，为近年弃耕地形成。3种植被类型在空间上呈相邻分布，基本情况见表1。

表1 油松人工林及草地基本情况

Table 1 Basic information of *Pinus tabulaeformis* plantations and grassland

植被类型 Vegetation type	海拔 Altitude/m	土壤类型 Soil type	林分密度 Stand density /(tree·hm ⁻²)	植被盖度 Vegetation coverage/%	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m
草地 Grassland	910	棕壤 Reddish-brown soil		95		
幼龄林 Young forest	760	黄棕壤 Yellow-brown soil	2 637	95	12.36	5.83
中龄林 Middle-aged forest	890	棕壤 Reddish-brown soil	1 956	85	18.62	12.25

1.2 样品采集

2024年3月，在油松中龄林、幼龄林和草地中分别设置5块大小为10 m×10 m的样地并采样，样地所在坡向都是东南坡，坡度较小且立地条件相似。

针叶样品：在油松人工林每个样地内选择3株长势良好、无病虫害的标准木采集针叶样品，针叶采样时按照林冠高度分为上、中、下3层，用高枝剪采集每层的阳面针叶，将每个样地内各层的油松针叶样品均匀混合成1个样品。

枯落物样品：在每个样地内随机设置3个1 m×1 m小样方，分别采集枯落物并混合为1个样品。

土壤样品：在每个样地内沿对角线设3个取样点，按0~10、10~20、20~30 cm分层采集土壤样品，将相同样地内同一层次土壤样品混匀，取样带回实验室进行有机碳含量和碳稳定同位素比值(C_{13}/C_{12})测定。

1.3 样品处理与分析

将针叶样品表面的浮尘和杂质用水冲洗，再用纯净水清洗，65℃下烘干至恒重，研细并充分混匀备用。枯落物预处理方法同针叶。土壤样品在室温下自然风干，剔除石砾、根系和动物残体等杂质，研磨后按四分法取样备用。所有样品预处理完成后，过0.15 mm标准尼龙筛装入自封袋备测，在干燥环境下保存。

1.4 碳含量与碳稳定同位素比值的测定

通过重铬酸钾氧化-外加热法^[14]测定针叶、枯落物和土壤有机碳含量。用稳定同位素质谱仪(FinniganMAT 253, Bremen, 德国)测定植物及土壤样品碳稳定同位素比值并计算 δ_{13C} (‰)，公式为：

$$\delta_{13C}/\text{‰} = \left[\frac{(C_{13}/C_{12})_{\text{样品}}}{(C_{13}/C_{12})_{\text{标准}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

式中： δ_{13C} 表示样品碳稳定同位素相对丰度(‰)。 C_{13} 表示重同位素(¹³C)的原子丰度； C_{12} 表示轻同位素(¹²C)的原子丰度。

1.5 数据统计分析

通过单因素方差分析(one-way ANOVA)对3种植被类型针叶、枯落物的有机碳含量及 δ_{13C} 进行方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$)，运用双因素方差分析法分析植被类型和土层对土壤有机碳含量和土壤 δ_{13C} 的影响，图中平均误差线为标准误差。运用Pearson相关性分析不同植被类型针叶、枯落物和不

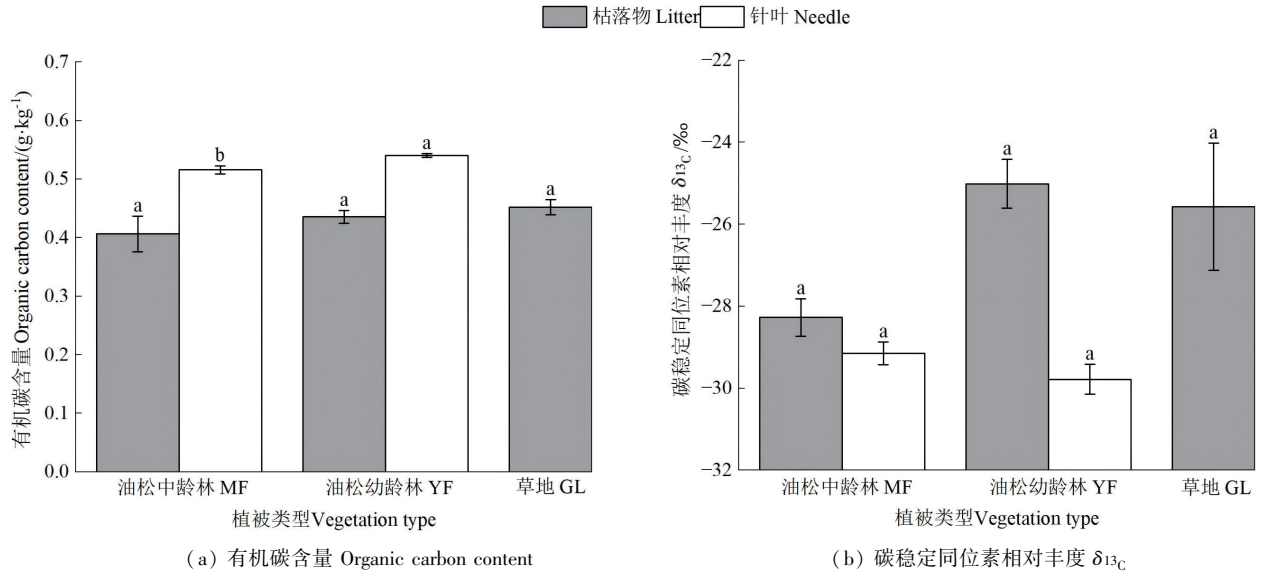
同土层土壤 δ_{13C} 的相关性。利用 δ_{13C} 与土壤有机碳含量对数的线性拟合方程 $\delta_{13C} = a + \beta \lg C$ 研究土壤 δ_{13C} 和土壤有机碳含量之间的关系, 根据回归方程斜率 β 来描述枯落物向土壤有机质转变引起的 δ_{13C} 变化。使用 Excel 2021 和 SPSS 26 软件进行数据处理和统计分析, 使用 Origin 2024 软件绘图。

2 结果分析

2.1 枯落物和针叶的有机碳含量及碳稳定同位素相对丰度

对各植被类型枯落物和针叶有机碳含量的分析显示[图 1(a)], 草地的枯落物有机碳含量最高, 油松幼龄林次之, 油松中龄林最低, 但三者间无显著差异 ($P > 0.05$)。油松幼龄林针叶有机碳含量显著高于中龄林 ($P < 0.05$)。

由[图 1(b)]可知, 枯落物 δ_{13C} 油松幼龄林最高, 草地次之, 油松中龄林最低, 但三者间差异未达显著水平 ($P > 0.05$)。油松中龄林针叶的 δ_{13C} 较幼龄林略高, 二者差异同样不显著 ($P > 0.05$)。



注: 不同小写字母表示不同植被类型间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: different lowercase letters indicate significant differences among different vegetation types ($P < 0.05$).

图 1 枯落物和针叶有机碳含量和碳稳定同位素相对丰度

Figure 1 Content of organic carbon and δ_{13C} in litter and needles

2.2 土壤有机碳含量和碳稳定同位素相对丰度

油松中龄林与草地的各层平均土壤有机碳含量均高于油松幼龄林[图 2(a)]; 3种植被类型土壤有机碳含量均随土壤深度增加呈递减趋势, 其中, 0~10 cm 土层显著高于 20~30 cm 土层 ($P < 0.05$)。在 0~10 cm 土层, 不同植被类型土壤有机碳含量排序为油松中龄林 > 草地 > 油松幼龄林, 其中, 油松中龄林与幼龄林的土壤有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$)。在 10~20 cm 土层, 各植被类型间土壤有机碳含量无显著差异 ($P > 0.05$); 在 20~30 cm 土层, 不同植被类型土壤有机碳含量依次为草地 > 油松中龄林 > 油松幼龄林, 其中, 草地土壤有机碳含量显著高于油松幼龄林 ($P < 0.05$), 而油松中龄林土壤有机碳含量与另外两种植被类型相比则无显著差异 ($P > 0.05$)。

不同植被类型土壤 δ_{13C} 整体上表现为油松幼龄林 > 油松中龄林 > 草地, 随土壤深度增加而逐渐升高, 但不同土层间无显著差异 [$P > 0.05$, 图 2(b)]。对各土层 δ_{13C} 研究发现, 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 各植被类型间土壤 δ_{13C} 无显著差异 ($P > 0.05$); 在 20~30 cm 土层, 不同植被类型土壤 δ_{13C} 表现为油松幼龄林 > 油松中龄林 > 草地, 其中, 油松幼龄林土壤 δ_{13C} 显著高于草地 ($P < 0.05$), 油松中龄林土壤 δ_{13C} 与草地、油松幼龄林相比均无显著差异 ($P > 0.05$)。

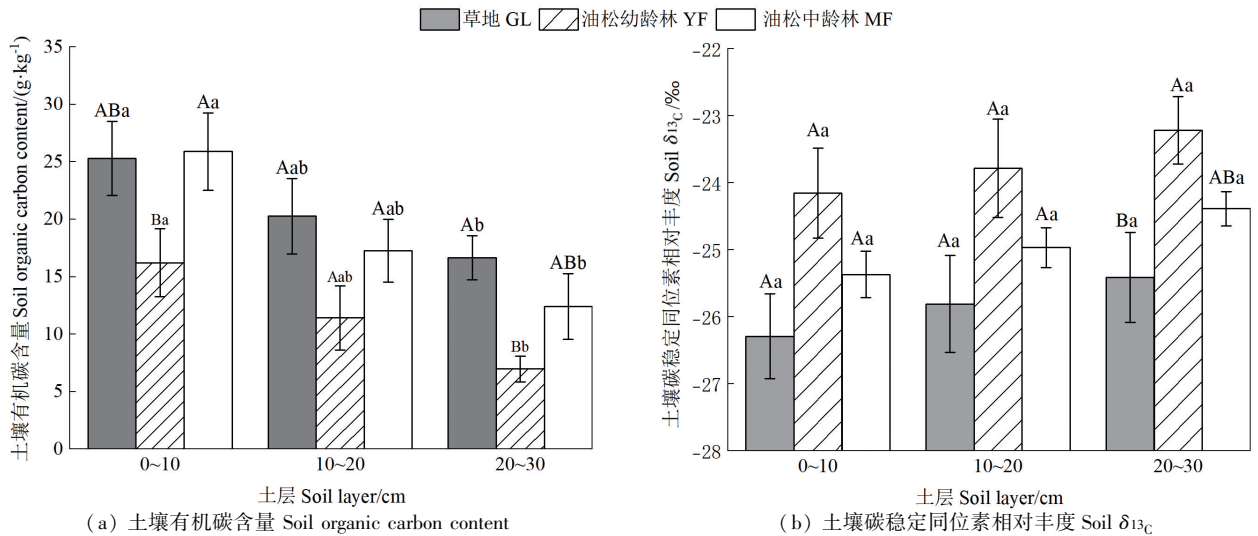


图 2 土壤有机碳含量和碳稳定同位素相对丰度

Figure 2 Content of soil organic carbon and δ_{13C}

2.3 土壤有机碳含量与碳稳定同位素相对丰度之间的关系

不同植被类型土壤 δ_{13C} 与 $\lg C$ 的回归分析结果见图 3 和表 2, 3 种植被类型的土壤 δ_{13C} 与 $\lg C$ 均存在显著负相关关系 ($P < 0.05$)。土壤 δ_{13C} 与 $\lg C$ 回归方程的斜率 β 绝对值 ($|\beta|$) 表征土壤有机碳分解速率, $|\beta|$ 越大, 表明土壤有机碳周转速率越快。本研究中 3 类植被的 $|\beta|$ 顺序为: 草地 (8.254 5) > 油松幼龄林 (3.895 2) > 油松中龄林 (2.331 1), 表明草地土壤碳周转速率显著高于森林植被, 且油松幼龄林土壤碳周转速率高于油松中龄林。

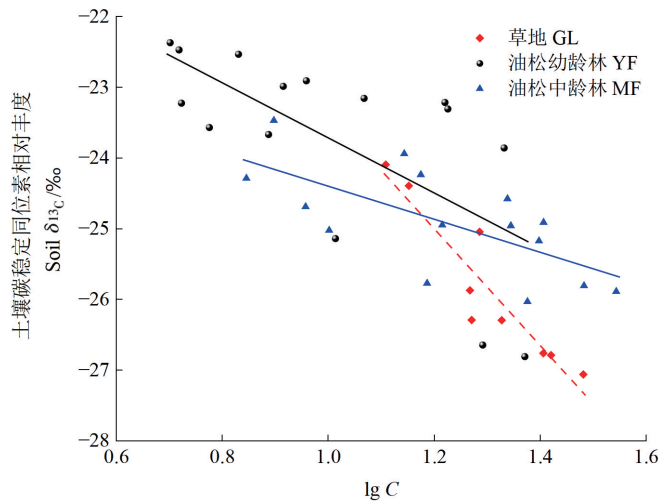


图 3 不同植被类型土壤 δ_{13C} 与 $\lg C$ 之间的回归关系

Figure 3 Regression relationship between δ_{13C} and $\lg C$ of different vegetation types

表 2 不同植被类型土壤 δ_{13C} 与 $\lg C$ 之间的回归模型参数

Table 2 Regression model parameters between δ_{13C} and $\lg C$ of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	样本量 Sample size	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2	概率值 P
草地 Grassland	9	$Y = -8.254 5X - 15.094 5$	0.868 2	0.000 3
幼龄林 Young forest	15	$Y = -3.895 2X - 19.818 0$	0.438 2	0.007 2
中龄林 Middle-aged forest	15	$Y = -2.331 1X - 22.065 2$	0.458 6	0.005 5

2.4 土壤、针叶和枯落物的碳稳定同位素相对丰度的相关性

对各类植被类型土壤、枯落物、针叶 δ_{13C} 的相关分析如表 3 所示, 0~10 cm 土层 δ_{13C} 与 10~20、20~30 cm 土层 δ_{13C} 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而与枯落物 δ_{13C} 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。10~20 cm 土层 δ_{13C} 同样与 20~30 cm 土层 δ_{13C} 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 并与枯落物 δ_{13C} 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。针叶 δ_{13C} 同各土层 δ_{13C} 及枯落物 δ_{13C} 之间均无显著相关性。

表 3 土壤、针叶和枯落物的碳稳定同位素相对丰度的相关性

Table 3 Correlation analysis between δ_{13C} in soil, needles, and litter

相关因素 Factor	0~10 cm 土层 0-10 cm soil layer	10~20 cm 土层 10-20 cm soil layer	20~30 cm 土层 20-30 cm soil layer	针叶 Needles	枯落物 Litter
0~10 cm 土层 0-10 cm soil layer	1.000 0	0.968 5 *	0.929 0 *	-0.373 5	-0.652 8 *
10~20 cm 土层 10-20 cm soil layer		1.000 0	0.932 1 *	-0.335 4	-0.737 5 *
20~30 cm 土层 20-30 cm soil layer			1.000 0	-0.091 8	-0.626 9
针叶 Needles				1.000 0	0.181 0
枯落物 Litter					1.000 0

注: * 表示 $P < 0.05$ 。Note: * $P < 0.05$ 。

3 讨论

3.1 植物叶片碳含量和碳稳定同位素相对丰度的指示意义

植物叶片 δ_{13C} 可有效指示植物光合作用的水分利用效率及其对逆境的适应能力^[15], 通常认为叶片 δ_{13C} 越大, 水分利用效率越高。李善家等^[16]对西北地区油松叶片碳稳定同位素特征的研究表明, 西北地区 10 个油松种群的针叶 δ_{13C} 介于 -28.68‰ ~ -25.02‰ 之间, 显著高于本区油松针叶的 δ_{13C} , 反映出西北地区油松具有更高的水分利用效率。这主要与西北地区干旱少雨自然条件有关, 植物通过提升水分利用效率以适应干旱胁迫环境。林木叶片 δ_{13C} 还可量化不同林龄树木的长期水分利用效率, 其数值随树龄增长呈现规律性变化。本研究区油松幼龄林针叶 δ_{13C} 略低于油松中龄林, 表明随林龄增加叶片 δ_{13C} 趋于上升。郑璐嘉等^[17]的研究结果也显示, 林龄为 3 a 和 8 a 的杉木, 其叶片 δ_{13C} 低于 46、21、14 a 林分, 油松幼龄林叶片 δ_{13C} 低的原因, 可能与植物水分利用效率、光合作用效率及碳同化过程调控机制的差异有关^[18]。

3.2 不同植被类型土壤碳含量的分布格局及生态学意义

本研究中, 土壤有机碳含量随土壤深度增加呈逐渐减少趋势, 且表层土壤有机碳含量最高。从土壤碳输入途径分析, 这一现象与植物根系发达程度、根系分泌物, 以及与根系共生的微生物种类和生物量相关^[14], 表层土壤(0~20 cm)因枯落物输入和微生物活动活跃而碳累积显著; 20 cm 以下土层碳主要来源于根系分泌物和细根周转, 差异较小^[8]。

油松中龄林和草地的土壤有机碳含量(0~30 cm)平均值高于油松幼龄林。对油松人工林而言, 在林分早期生长阶段, 由于有机质输入量较低, 幼龄林中的土壤有机碳含量常常低于更高龄级林分土壤的有机碳含量^[19]。而草地造林形成幼龄林后, 其原有的稳定碳库被打破, 枯落物输入类型和质量的改变, 尤其是针叶林, 其林下枯落物木质素含量高但分解速率慢, 会导致微生物活性重组。受此影响, 在短期内原有的细根周转和根系分泌物输入中断, 而人工林根系尚未形成稳定网络, 导致土壤活性碳(如可溶性有机碳、微生物生物量碳)的分解速率超过累积速率^[20], 因而幼龄林土壤有机碳含量低于草地。冯棋等^[21]在黄土丘陵区的研究也表明, 造林后前 20 a 土壤有机碳含量低于原农田或草地, 需经历有机质矿化与累积的平衡期后才进入净固碳阶段。

3.3 土壤碳稳定同位素相对丰度的分布格局及生态学意义

土壤 δ_{13C} 与植被类型和枯落物质量有密切关系。戴允泽^[22]对亚热带常绿阔叶林的研究表明, 土壤 δ_{13C} 随林龄增长而上升, 这与刁浩宇等^[5]发现的演替进程中土壤 δ_{13C} 持续增加现象一致。其机理在于阔叶林林龄增长促使枯落物积累, 刺激微生物生物量增长, 进而加速土壤有机碳矿化, 最终导致土壤中 δ_{13C} 富集^[22]。然而, 本研究的油松中龄林呈现不同规律: 林下灌草稀疏, 随林龄积累的枯落物以针叶为

主, 针叶富含难分解的木质素, 分解程度较低, 残留的轻碳 (^{12}C) 比例较高, 故其 $\delta_{13\text{C}}$ 相对较低。油松幼龄林因林分未郁闭且造林前为耕地, 林内大白茅等草本植物茂盛, 产生大量易分解的枯落物, 促使土壤中 ^{13}C 富集, 导致幼龄林土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 显著高于油松中龄林。

土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 的垂直分布是植被类型、有机质分解过程及环境因子综合作用的结果^[23]。土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 通常随土壤深度增加和有机碳含量降低而升高^[5-6]。在特定生态系统中, 较低的 $\delta_{13\text{C}}$ 通常指示了土壤中新鲜有机质的输入, 而较高的 $\delta_{13\text{C}}$ 则与有机质连续周转过程中形成的旧有机质相关^[9]。这种土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 垂直分布格局不仅体现了其对土壤有机质来源的直接响应, 也揭示了土壤碳循环过程对环境变化的敏感性。多数研究表明, 草地 $\delta_{13\text{C}}$ 随土层深度递增, 如高寒草甸土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 从表层土壤的 -27.2‰ 升至深层土壤的 -25.7‰ ^[24], 这归因于草地表层土壤接近现代 C_3 植被特征, 深层土壤则可能受历史 C_4 植被或微生物分馏作用主导。森林土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 垂直分布格局相对复杂: RAZANAMAHANDRY *et al.*^[25] 在马达加斯加阿拉特拉湖流域研究发现, 原始森林和草地的 $0\sim 5\text{ cm}$ 表土层 $\delta_{13\text{C}}$ 仅在 -27.1‰ 至 -25.5‰ 间以微小幅度波动; 随深度增加, $\delta_{13\text{C}}$ 逐渐升高至 60 cm 处的 -24.1‰ 左右; 60 cm 深度以下土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 不再呈现系统性变化, 而是在狭窄区间内波动。PAUL *et al.*^[26] 研究证实, 深层土壤 ($>50\text{ cm}$) $\delta_{13\text{C}}$ 因微生物分馏作用持续富集 ^{13}C , 并强调历史植被 $\delta_{13\text{C}}$ 变化是土壤平均 $\delta_{13\text{C}}$ 随深度增加而增大的关键因素。类似地, XIA *et al.*^[27] 在河口湿地土壤剖面中发现 $\delta_{13\text{C}}$ 有明显的深度梯度, $0\sim 40\text{ cm}$ 土层 $\delta_{13\text{C}}$ 随深度持续增大。本研究中, 3种植被类型土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 平均值同样呈现随深度递增的趋势, 但因受采样深度限制 ($0\sim 30\text{ cm}$), 未能揭示更深层土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 的变化规律。未来研究需整合 ^{13}C 标记技术与微生物组学, 深入解析根际激发效应及深层碳周转的时空异质性。在草地和油松人工林管理中, 需对油松中龄林实施间伐与施肥, 缓解林木养分竞争, 促进枯落物分解与碳垂直迁移, 从而提升土壤固碳能力。

土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 的变化受多重因素调控, 包括植被类型^[7]、气候条件(温度与降水)、土壤氮含量和土壤质地^[24]、海拔以及土地利用历史^[28]。本研究中3种植被类型覆盖下的土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 背景值对研究结果存在影响, 但目前难以追溯到与这3种植被类型可对比的初始土地利用状态下的土壤条件。因此, 本研究基于“时空互代”的研究思路, 揭示植被恢复过程中土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 的动态特征。

对同处秦岭南麓的佛坪保护区弃耕地植被恢复过程的碳积累研究显示, 以农田(植被恢复起点, 0 a)为基准, $0\sim 10\text{ cm}$ 、 $10\sim 20\text{ cm}$ 和 $20\sim 30\text{ cm}$ 土层的 $\delta_{13\text{C}}$ 背景值依次为 -25.47‰ 、 -24.79‰ 和 -24.23‰ ; 随着植被恢复进程的推进, 各恢复阶段土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 均呈下降趋势^[29]。本研究中, 3种植被类型 $0\sim 10\text{ cm}$ 和 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层间的 $\delta_{13\text{C}}$ 均无显著差异; 而在 $20\sim 30\text{ cm}$ 土层, $\delta_{13\text{C}}$ 表现为油松幼龄林 $>$ 油松中龄林 $>$ 草地, 未遵循随恢复年限递减的规律。此外, 佛坪保护区弃耕 $11\sim 18\text{ a}$ 的草地, 其 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层 $\delta_{13\text{C}}$ 为 -26.86‰ , 低于本研究对应土层的 $\delta_{13\text{C}}$; 而该草地 $10\sim 20\text{ cm}$ 和 $20\sim 30\text{ cm}$ 土层的 $\delta_{13\text{C}}$ 分别为 -25.25‰ 和 -24.88‰ ^[29], 高于本研究相同土层的 $\delta_{13\text{C}}$ 。在保护区生长 $20\sim 100\text{ a}$ 的落叶阔叶林, 各土层 $\delta_{13\text{C}}$ 介于 $-27.05\text{‰}\sim -25.53\text{‰}$ 之间^[29], 明显低于本研究油松林各土层的 $\delta_{13\text{C}}$, 这种差异可能与植被类型和恢复年限有关。要精准揭示针叶林恢复过程中土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 的动态特征, 需开展更长时间序列、并细化环境因子的控制研究。

3.4 土壤碳稳定同位素相对丰度对有机碳周转的指示意义

土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 蕴含有机质形成过程的时间信息, 可揭示历史植被变化的时间序列^[26]。本研究发现土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 与土壤有机碳呈负相关关系, 与既有研究结论一致^[24,30], 其成因在于微生物对含 ^{12}C 的底物优先利用及分解过程中 ^{13}C 的动力学分级^[31]。土壤 $\delta_{13\text{C}}$ 与 $\lg C$ 回归方程的斜率 β 可以反映土壤碳库动态变化的关键驱动因素, 对预测气候变化下的土壤碳循环至关重要^[24]。 β 也可以表征微生物活动对土壤有机碳周转率的影响, $|\beta|$ 越大, 表示土壤有机碳周转速率越快^[30]。气候因子(如温度、降水)和土壤性质(如质地、pH 值、微生物活性)共同调控 β , 进而决定土壤有机碳的空间分布格局^[32]。本研究中草地、油松幼龄林和油松中龄林的 $|\beta|$ 分别为 $8.254\ 5$ 、 $3.895\ 2$ 和 $2.331\ 1$, 表明随植被恢复时间和林分成熟度提升, $|\beta|$ 降低, 从而土壤有机碳周转率减缓。该规律与 XIONG *et al.*^[33] 对我国亚热带老龄林的研究结论吻合, 其成因可能与森林土壤微生物群落变化及氮含量、pH 值调控相关。CHEN *et al.*^[34] 在中国东北落

叶阔叶林中的研究发现,氮添加通过促进矿物结合有机碳的形成,增强了对碳的保护作用,显著提升土壤有机碳稳定性并抑制其分解,导致 δ_{13C} 上升与有机碳分解速率下降。高 $|\beta|$ 对应土壤有机质的快速周转,例如长白山岳桦林($|\beta|=2.92$)的土壤有机碳周转快于阔叶红松林($|\beta|=0.95$)^[8];本研究中草地 $|\beta|$ 最大(8.254 5),表明草地土壤有机碳更易被微生物分解,碳驻留时间最短,周转率最高。

需要注意的是,基于 δ_{13C} 和 $\lg C$ 的回归模型可以用于估算土壤有机碳周转率,但其适用范围受到研究区域、尺度和驱动因素的影响^[33]。因此,目前该模型仅能对不同生态系统类型下的有机质周转速度进行定性比较,但难以精确计算其速率或量级^[35]。未来研究中应整合室内培养实验和¹⁴C同位素示踪技术,以完善现有模型的定量分析能力,以便更加深入地理解土壤有机碳的动态变化及其驱动机制。

4 结论

3种植被类型的枯落物有机碳含量及 δ_{13C} 值均无显著差异,表明源于枯落物的稳定性碳输入在不同植被类型间无显著差异。土壤 δ_{13C} 随土层加深逐渐升高,而土壤有机碳含量则随土层加深而逐渐降低。各植被类型土壤 δ_{13C} 整体表现为油松幼龄林>油松中龄林>草地,且不同植被类型间无差异显著。0~10 cm表层土壤 δ_{13C} 与枯落物 δ_{13C} 呈显著负相关,但与其他土层 δ_{13C} 呈显著正相关,这一关联特征揭示了表层土壤在生态系统碳循环中具有独特的功能地位。在3种植被类型中,草地土壤碳周转速率最快,油松幼龄林次之,油松中龄林最慢。

参考文献

- [1] MAHAKATA I, GONHI P. Post shallow-landslide habitat disturbance and vegetation recovery status in a Wet Montane Wildlife Sanctuary in Chimanimani, Zimbabwe[J]. Asian Journal of Environment & Ecology, 2025, 24(2): 85-96.
- [2] XU W B, ZHANG B B, XU Q, *et al.* Enhanced carbon storage in mixed coniferous and broadleaf forest compared to pure forest in the north subtropical-warm temperate transition zone of China[J]. Forests, 2024, 15(9): 1 520.
- [3] ZHU Y F, WANG L P, MA J, *et al.* Assessment of carbon sequestration potential of mining areas under ecological restoration in China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 921: 171 179.
- [4] 周序力,蔡琼,熊心雨,等. 贵州月亮山不同演替阶段亮叶水青冈林碳储量及其分配格局[J]. 植物生态学报, 2018, 42(7): 703-712.
- [5] 刁浩宇,王安志,袁凤辉,等. 长白山阔叶红松林演替序列植物-凋落物-土壤碳同位素特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1 435-1 444.
- [6] GAUTAM M K, LEE K S, SONG B Y, *et al.* Site related δ_{13C} of vegetation and soil organic carbon in a cool temperate region[J]. Plant and Soil, 2017, 418(1/2): 293-306.
- [7] 张苗苗,刘廷玺,段利民,等. 半干旱沙丘与草甸典型植被类型区大气-叶片-凋落物-土壤连续体碳同位素特征[J]. 生态学报, 2022, 42(18): 7 663-7 675.
- [8] GAO Y, ZHOU J, WANG L M, *et al.* Distribution patterns and controlling factors for the soil organic carbon in four mangrove forests of China[J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 17: e00 575.
- [9] MENG D Y, SHAO Y, LUO M, *et al.* Characterisation of organic carbon distribution and turnover by stable carbon isotopes in major types of soils in China[J]. Environmental Chemistry, 2023, 20(7): 281-291.
- [10] 喻阳华,程雯,杨丹丽,等. 黔西北次生林优势树种叶片-凋落物-土壤连续体有机质碳稳定同位素特征[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8 733-8 740.
- [11] 钱信禹,边小卫,张亚峰,等. 丹江源地区地质建造对土壤和植被生态空间格局的影响[J]. 现代地质, 2023, 37(4): 903-913.
- [12] YAO Y H, CUI L L. Vegetation dynamics in the Qinling-Daba Mountains through climate warming with land-use policy[J]. Forests, 2022, 13(9): 1 361.
- [13] 国家林业局. 主要树种龄级与龄组划分: LY/T2908—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [14] COTRUFO M F, RANALLI M G, HADDIX M L, *et al.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(12): 989-994.
- [15] HUSSAIN M I, AL-DAKHEEL A J. Effect of salinity stress on phenotypic plasticity, yield stability, and signature of stable isotopes of carbon and nitrogen in safflower[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(24): 23 685-23 694.
- [16] 李善家,张有福,陈拓. 西北地区油松叶片稳定碳同位素特征与生理指标的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2010,

- 16(5): 603-608.
- [17] 郑璐嘉, 黄志群, 何宗明, 等. 林龄、叶龄对亚热带杉木人工林碳氮稳定同位素组成的影响[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 22-28.
- [18] 路伟伟, 余新晓, 贾国栋, 等. 基于树轮 δ_{13C} 值的北京山区油松水分利用效率[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 2 093-2 100.
- [19] NOH N J, SON Y, LEE S K, *et al.* Carbon and nitrogen storage in an age-sequence of *Pinus densiflora* stands in Korea[J]. Science China Life Sciences, 2010, 53(7): 822-830.
- [20] 刘畅, 任艳林, 贺金生. 草地造林 40 年后土壤可溶性有机碳下降[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(3): 511-518.
- [21] 冯棋, 杨磊, 王晶, 等. 黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6 598-6 609.
- [22] 戴允泽. 亚热带不同林龄常绿阔叶林土壤碳稳定机制及其对氮沉降的响应[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- [23] 刘丽贞, 庞丹波, 王新云, 等. 稳定碳同位素技术在土壤有机碳研究中的应用进展[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 123-132.
- [24] WANG C, HOULTON B Z, LIU D W, *et al.* Stable isotopic constraints on global soil organic carbon turnover[J]. Biogeosciences, 2018, 15(4): 987-995.
- [25] RAZANAMAHANDRY V F, DEWAELE M, GOVERS G, *et al.* Stable isotope profiles of soil organic carbon in forested and grassland landscapes in the Lake Alaotra basin (Madagascar): insights in past vegetation changes[J]. Biogeosciences, 2022, 19(16): 3 825-3 841.
- [26] PAUL A, BALESSENT J, HATTÉC. ^{13}C - ^{14}C relations reveal that soil ^{13}C -depth gradient is linked to historical changes in vegetation ^{13}C [J]. Plant and Soil, 2020, 447(1/2): 305-317.
- [27] XIA S P, SONG Z L, LI Q, *et al.* Distribution, sources, and decomposition of soil organic matter along a salinity gradient in estuarine wetlands characterized by C : N ratio, δ_{13C} - δ_{15N} , and lignin biomarker[J]. Global Change Biology, 2021, 27(2): 417-434.
- [28] 耿文达, 季文兵, 刘冰权, 等. 碳同位素在土壤-植被-生态-环境中的研究现状与进展[J]. 中国地质, 2025, 52(3): 867-889.
- [29] YOU Y, LI W P, CHEN Y C, *et al.* Soil carbon and nitrogen accumulation during long-term natural vegetation restoration following agricultural abandonment in Qingling Mountains[J]. Ecological Engineering, 2024, 201: 107 212.
- [30] ZHOU T, LAI Y S, YANG Z H, *et al.* Modelling soil δ_{13C} across the Tibetan Plateau using deep-learning[J]. Journal of Environmental Informatics, 2024, 44(1): 48-60.
- [31] VOLK M, BASSIN S, LEHMANN M F, *et al.* ^{13}C isotopic signature and C concentration of soil density fractions illustrate reduced C allocation to subalpine grassland soil under high atmospheric N deposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 125: 178-184.
- [32] CHEN L R, WEN Z Y, YIN R Y, *et al.* Soil organic carbon turnover response to nitrogen and phosphorus additions in eastern China: evidence from stable carbon isotopes[J]. Forests, 2023, 14(7): 1 314.
- [33] XIONG X, LIU J X, ZHOU G Y, *et al.* Reduced turnover rate of topsoil organic carbon in old-growth forests: a case study in subtropical China[J]. Forest Ecosystems, 2021, 8(1): 58.
- [34] CHEN Z J, GENG S C, ZHOU X Y, *et al.* Nitrogen addition decreases soil aggregation but enhances soil organic carbon stability in a temperate forest[J]. Geoderma, 2022, 426: 116 112.
- [35] GAO J Q, LEI G C, ZHANG X W, *et al.* Can δ_{13C} abundance, water-soluble carbon, and light fraction carbon be potential indicators of soil organic carbon dynamics in Zoigê wetland? [J]. CATENA, 2014, 119: 21-27.

(责任编辑: 卢凤美)