

DOI: 10.5846/stxb201807091489

喻阳华, 程雯, 杨丹丽, 钟欣平. 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. 生态学报, 2018, 38(24): - .

Yu Y H, Cheng W, Yang D L, Zhong X P. Carbon stable isotopic characteristics of organic matter in the leaf-litter-soil continuum of dominant tree species in a secondary forest in northwestern Guizhou. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): - .

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

喻阳华^{1,*}, 程雯¹, 杨丹丽², 钟欣平²

¹ 贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001

² 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001

摘要: 稳定性碳同位素自然丰度($\delta^{13}\text{C}$)能够揭示生态系统长时间尺度的有机碳动态变化, 阐明生态系统功能的变化特征。以黔西北次生林 14 个优势树种为研究对象, 测定叶片、凋落物以及根区土壤有机碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 分析不同层次碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间的相关性。结果表明: 14 个优势树种叶片碳含量为 404.67—487.14 g/kg, 总体为针叶树种较高、常绿灌木较低; $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -31.2‰ — -27.1‰ , 随生活型的变化规律不明显。凋落物碳含量为 414.62—561.31 g/kg, 与叶片碳含量的变化规律较为一致; $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -31.5‰ — -27.3‰ , 随树种生活型的变化特征也不明显。根区土壤碳含量为 10.02—91.59 g/kg, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -26.8‰ — -22.5‰ , 碳含量以光皮桦、银白杨等落叶乔木较高。叶片、凋落物和根区土壤 3 个层次的碳含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间均呈不显著相关, 不同层次的 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间和碳含量之间均为正相关。研究结果有助于反映森林生态系统碳循环过程的关键信息, 为森林植被恢复提供理论依据。

关键词: $\delta^{13}\text{C}$ 值; 次生林; 优势树种; 叶片-凋落物-土壤连续体; 黔西北

Carbon stable isotopic characteristics of organic matter in the leaf-litter-soil continuum of dominant tree species in a secondary forest in northwestern Guizhou

YU Yanghua^{1,*}, CHENG Wen², YANG Danli², ZHONG Xinping²

¹ School of Karst Science / State Engineering Technology Institute for Karst Decertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

² School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: The natural abundance of stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) can reveal the dynamic changes of organic carbon over time and illustrate the characteristics of functional changes in ecosystems. Using 14 dominant tree species in the secondary forest in northwestern Guizhou, the organic carbon contents and $\delta^{13}\text{C}$ values in leaves, litter, and root-zone soil were measured to analyze the correlation between carbon content and $\delta^{13}\text{C}$ abundance at different levels. The results showed that: the carbon content of leaves of the 14 dominant tree species was 404.67—487.14 g/kg. Generally, the carbon content was higher in conifers and lower in evergreen shrubs. The $\delta^{13}\text{C}$ value was -31.2‰ to -27.1‰ , and the change with life form was not obvious. The litter carbon content was 414.62—561.31 g/kg, which was consistent with the change of leaf carbon content; the $\delta^{13}\text{C}$ value was -31.5‰ to -27.3‰ , and the changing characteristics of life form in tree species were not obvious. The carbon content in root-zone soil was 10.02—91.59 g/kg, the $\delta^{13}\text{C}$ value was from -26.8‰ to -22.5‰ . The carbon content was higher in deciduous trees, such as *Rhododendron simsii* and *Populus alba*. There was no significant

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2016YFC0502601); 贵州省科技计划项目(黔科合 LH 字[2016]7201 号)

收稿日期: 2018-07-09; **修订日期:** 2018-10-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuyanghua2003@163.com

correlation between the carbon content of leaves, litter, and root-zone soil at different levels and the abundance of $\delta^{13}\text{C}$ value. A positive correlation was found between the abundance of $\delta^{13}\text{C}$ value and carbon content at different levels. The results could help to reveal fundamental information of the carbon cycle process in forest ecosystems and provide a theoretical basis for forest vegetation restoration.

Key Words: $\delta^{13}\text{C}$ value; secondary forest; dominant tree species; leaf-litter-soil continuum; northwest Guizhou

优势树种是对群落结构与环境的形成有明显控制作用的植物种。碳作为重要的生命元素,是构成植物体干物质的主要元素,其生物地球化学循环过程一直是生态学研究热点^[1]。植物和土壤是陆地碳库的重要组成部分,有机碳及其稳定同位素组成能够反映生态系统碳循环的关键信息,表征陆地生态系统碳动态及碳资源的可持续发展^[2-3]。植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值能够准确记录与植物生长过程相联系的气候环境信息,综合反映植物碳同化过程和水分消耗以及水分利用效率^[4-5]。优势树种叶片、凋落物与土壤垂直层次的有机质碳同位素组成反映了森林生态系统重要的环境信息,能够揭示他们的环境行为^[6-7],对阐明 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征具有重要的科学意义和现实意义。

近年来,生态系统有机碳的研究已被学者们广泛关注,包括分配与周转、循环模型等^[8-9],实现了长时间尺度的碳循环研究。李龙波等^[10]探讨了贵州喀斯特山区石灰土和黄壤有机质的垂直分布特征和稳定碳同位素组成差异;赵云飞等^[11]利用碳稳定同位素技术分析得出随着草甸退化,土壤碳汇能力减弱;司高月等^[12]基于稳定性碳同位素技术,分析了长白山垂直带森林叶片-凋落物-土壤连续体的碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度,得知针叶树种潜在的碳蓄积能力更强。开展森林植物-凋落物-土壤连续体的碳动态研究,有助于深入了解森林生态系统碳固存及其动态变化。但是现有研究集中在群落尺度^[13],未见喀斯特森林中优势树种“叶片-凋落物-土壤连续体”垂直层次中有机质碳稳定同位素变化特征报道。增加种群尺度的研究,有利于探究喀斯特森林演替过程中碳循环和周转的变化,实现研究结果的尺度转化与提升。

黔西北地区属喀斯特高原山地地貌,是长江流域上游重要生态屏障和生物多样性保护区,在长江经济带建设中具有重要的战略地位。由于 20 世纪末以前受到取材、伐薪、开荒、放牧等人为过度干扰,导致植被不断退化^[14]。基于此,本文以黔西北次生林 14 个优势树种为研究对象(表 1),采用稳定性碳同位素法,试图回答以下 2 个问题:(1)阐明次生林优势树种叶片-凋落物-土壤连续体的碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度及其变化特征,揭示系统碳循环规律;(2)探讨不同层次碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间相互作用效应,揭示碳元素的继承性与转化机理。研究结果能够为生态系统碳循环过程与机制的研究提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

位于贵州省毕节市七星关区西部六冲河流域支流区,地理坐标为 $105^{\circ}02'01''$ — $105^{\circ}08'09''\text{E}$, $27^{\circ}11'36''$ — $27^{\circ}16'51''\text{N}$,属喀斯特高原山地生态环境。区内海拔 1600—2000 m, $>10^{\circ}\text{C}$ 年积温 3717°C , 年平均气温约为 14.03°C , 多年平均降雨量在 863 mm, 主要集中在 7—9 月, 占全年降雨量的 52.6%, 气候总体特征为寒冷、干旱。地貌类型多样, 地形破碎, 耕地多分布于坡面、台地和山间谷地, 常形成环山梯土和沟谷坝地。有明暗交替的河流, 漏斗、盲谷、落水洞、天窗、溶蚀洼地。地带性植被主要为针阔混交林和阔叶林, 但是长期以来由于人为干扰强烈, 退化植被所占比重较大, 灌木林和人工林分布较多。土壤以黄壤为主, 部分地区有山地黄棕壤和石灰土^[15]。区内社会经济发展水平不高, 种植业以马铃薯、玉米为主, 养殖业以牛、羊为主, 能源以煤炭、薪柴、电为主, 放牧与伐薪是影响森林植被演替的重要人为因素, 也是植被恢复的关键限制因子。

1.2 优势树种确定

2016 年 7—8 月, 选择自然、开阔的地段, 避开近年来受到人为严重干扰的斑块, 设置 16 块典型森林样

地,开展植物群落学调查,记录海拔、经度、纬度、坡度、坡位、坡向等地理因子和物种名称、数量、冠幅、株高、胸径和地径等测树因子。计算样地内物种的重要值,由大到小进行排序,按照重要值 > 25% 的原则,筛选了代表黔西北地区植物群落的 14 个优势树种(表 1),作为本文的研究对象。

表 1 优势树种基本概况

Table1 Basic characteristic of dominant tree species

树种 Species	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Direction	坡位 Position	土壤类型 Soil type	树高 Height/m	生活型 Life form
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	1832	28	西南	中	黄壤	16.0	常绿乔木
华山松 <i>Pinus armandii</i>	1832	28	西南	中	黄壤	13.8	常绿乔木
白栎 <i>Quercus fabri</i>	1832	28	西南	中	黄壤	3.0	落叶灌木
火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	1852	32	西南	中	黄壤	1.8	常绿灌木
马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	1852	32	西南	中	黄壤	0.9	常绿灌木
栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>	1847	33	南	中	黄壤	2.2	落叶灌木
川榛 <i>Corylus heterophylla</i>	1847	33	南	中	黄壤	1.7	落叶灌木
毛栗 <i>Castanea mollissima</i>	1800	50	西南	中	石灰土	3.5	落叶灌木
杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i>	1800	50	西南	中	石灰土	3.5	常绿灌木
光皮桦 <i>Rhododendron simsii</i>	1850	33	西南	上	黄壤	16.3	落叶乔木
金丝桃 <i>Hypericum monogynum</i>	1850	33	西南	上	黄壤	1.0	常绿灌木
银白杨 <i>Populus alba</i>	1811	20	东南	中	黄壤	15.2	落叶乔木
核桃 <i>Juglans regia</i>	1785	15	西南	中	黄壤	2.5	落叶乔木
刺梨 <i>Rosa roxburghii</i>	1770	10	西南	中	石灰土	9.6	落叶灌木

1.3 样品采集

同一植物群落类型选取 3 块坡位、坡向、坡度、海拔相似的样地,大小为 20 m×20 m,每个样地内按 S 型路线选择 5 株距离其他树种较远、受影响相对较小的植株,多点混合法采集叶片、表层凋落物与根区土壤。于上午 11 时前采集生长良好、无病虫害且较为成熟的叶片,混匀装入尼龙网袋,带回实验室后置于恒温干燥箱中 65℃ 烘干至恒质量,研细并充分混匀备用。在距离树干基部 0—150 cm 范围内随机均匀地采集目标树种的凋落物,采用与叶片相同的方法进行预处理。采集根区土壤时,取树干基部 20—30 cm 且距离其他树种 100—150 cm 的土壤,深度为 0—20 cm,5 点采集组成混合样,充分混匀后,四分法取约 1 kg 后立即带回实验室。采集的叶片、凋落物和土壤样品均为 42 个。土壤剔除可见砾石、根系及动植物残体,自然风干后研磨,依次通过 2.00、0.15 mm 筛备用。

1.4 碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度测定

叶片、凋落物和土壤有机碳均采用重铬酸钾氧化—外加热法测定^[16];稳定碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)采用稳定同位素质谱仪测定^[17],标准样品选用美国南卡罗纳州白垩系皮狄组地层中的美洲拟箭石(PDB),定义其 $\delta^{13}\text{C} = 0.01124$ 。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析检验不同树种之间叶片、凋落物和根区土壤碳含量的差异;采用 Pearson 法进行不同垂直层次碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间的相关关系分析。采用 OriginPro 2016 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 次生林优势树种叶片碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度

14 个优势树种叶片碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度存在差异(图 1)。碳含量为银白杨最高((487.14±3.72) g/kg)、马桑最低((404.67±7.74) g/kg),总体表现为针叶树种较高、常绿灌木较低,说明针叶树种有机物含量高,潜

在碳蓄积能力强; $\delta^{13}\text{C}$ 值以马桑的 -27.1‰ 为最高、金丝桃的 -31.2‰ 为最低,表明马桑的水分利用效率较高、金丝桃较低。从生活型看,常绿乔木、落叶乔木、常绿灌木和落叶灌木的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -29.6‰ 、 -30.3‰ 、 -29.3‰ 与 -28.7‰ ,未发现水分利用效率随生活型的变化规律。

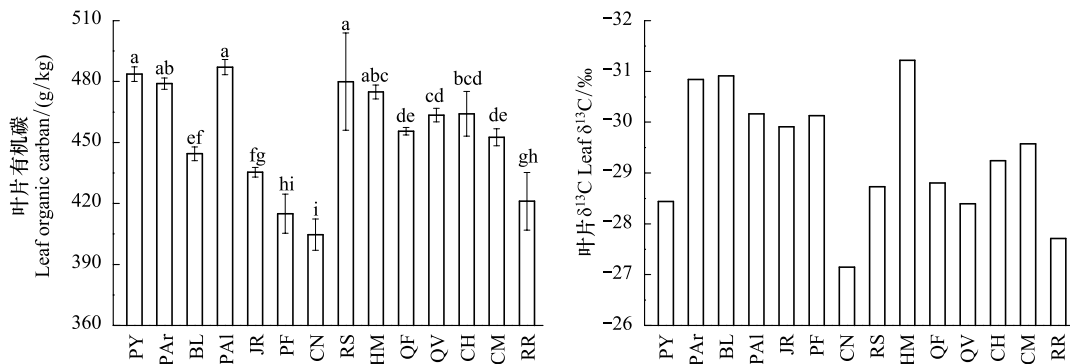


图1 不同树种叶片碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度

Fig.1 Variation of foliar C concentration and $\delta^{13}\text{C}$ value among species

PY: 云南松 *Pinus yunnanensis*; PAr: 华山松 *Pinus armandii* Franch; BL: 光皮桦 *Betula luminifera*; PAl: 银白杨 *Populus alba*; JR: 核桃 *Juglans regia*; PF: 火棘 *Pyracantha fortuneana*; CN: 马桑 *Coriaria nepalensis*; RS: 杜鹃 *Rhododendron simsii*; HM: 金丝桃 *Hypericum monogynum*; QF: 白栎 *Quercus fabri*; QV: 栓皮栎 *Quercus variabilis*; CH: 川榛 *Corylus heterophylla*; CM: 毛栗 *Castanea mollissima*; RR: 刺梨 *Rosa roxbunghii*; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 数据形式为平均值 $\pm$ 标准差

2.2 次生林优势树种凋落物碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度

14 个优势树种凋落物碳含量与叶片碳含量的变化规律较为一致。凋落物碳含量为常绿针叶乔木树种马尾松 (561.31 ± 5.76 g/kg)、华山松 (512.46 ± 6.46 g/kg) 最高,落叶树种川榛 (508.83 ± 4.64 g/kg)、银白杨 (507.10 ± 1.21 g/kg)、光皮桦 (500.91 ± 1.86 g/kg)、毛栗 (496.42 ± 3.84 g/kg) 等次之,经济树种核桃 (433.91 ± 2.56 g/kg)、刺梨 (422.67 ± 4.84 g/kg) 等较低;凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度则以马桑最高 (-27.3‰)、杜鹃最低 (-31.5‰)。从生活型看,常绿乔木、落叶乔木、常绿灌木和落叶灌木的凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -29.1‰ 、 -29.7‰ 、 -29.0‰ 、与 -29.3‰ ,随树种生活型的变化特征不明显(图2)。

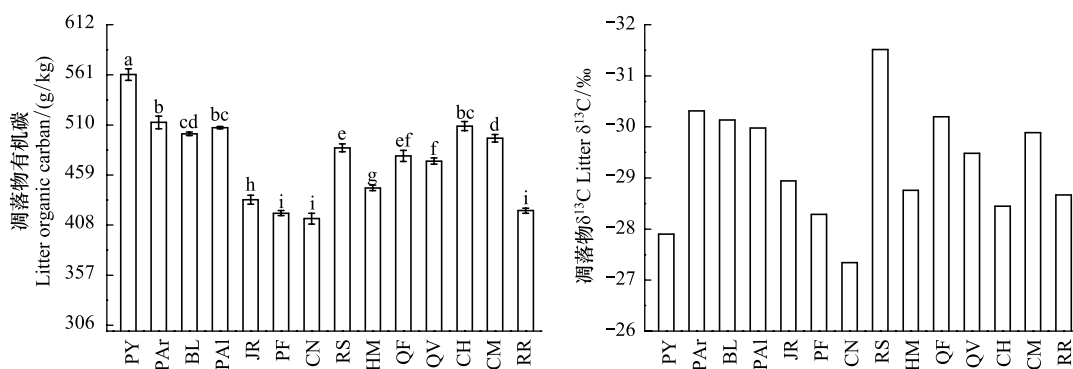


图2 不同树种凋落物碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度

Fig.2 Variation of litter C concentration and $\delta^{13}\text{C}$ value among species

2.3 次生林优势树种根区土壤碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度

土壤碳含量的变化幅度为 $10.02\text{—}91.59$ g/kg, $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化区间为 -26.8‰ — -22.5‰ (图3)。落叶乔木树种光皮桦 (91.59 ± 2.32 g/kg)、银白杨 (72.45 ± 0.71 g/kg) 的根区土壤碳含量较高;火棘 (10.02 ± 0.55 g/kg)、金丝桃 (25.41 ± 0.47 g/kg) 等常绿灌木,白栎 (15.56 ± 0.53 g/kg)、刺梨 (31.81 ± 0.83 g/kg) 等落叶灌木和华山松 (17.87 ± 0.48 g/kg)、云南松 (31.72 ± 0.66 g/kg) 等常绿乔木的根土土壤碳含量较低。根区

土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值以川榛 (-22.5‰) 最高、马桑和核桃 (-26.8‰) 最低。

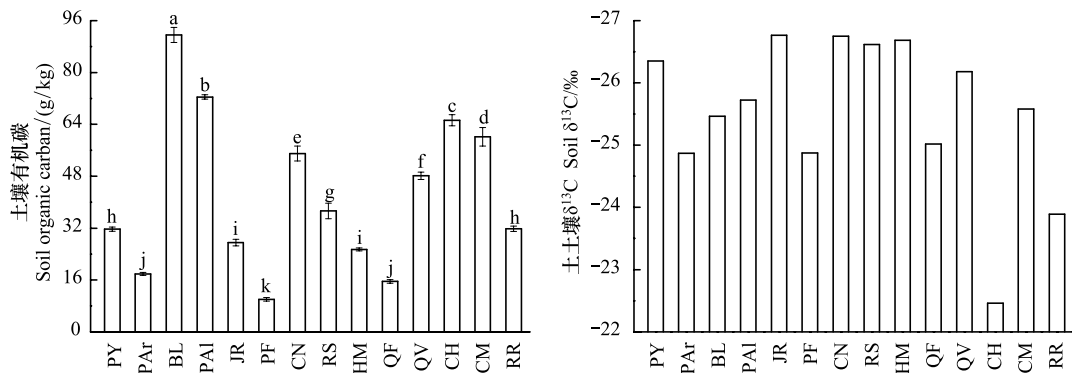


图3 不同树种根区土壤碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度

Fig.3 Variation of root-zone soil C concentration and $\delta^{13}\text{C}$ value among species

2.4 不同层次碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间的相关性

由表 2 可见,叶片、凋落物层的碳含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间均为负相关,土壤层则为正相关,但相关性均不显著;不同层次的 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间均表现为正相关,但关系不显著;不同层次的碳含量之间亦表现为正相关,但仅叶片层和凋落物层呈显著相关(相关系数为 0.809),其余相关性不显著。

表 2 叶片、凋落物和土壤碳含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间的相关分析

Table 2 Correlation analysis for C concentration and $\delta^{13}\text{C}$ value of leaf, litter, and soil

指标 Index	C_{leaf}	$\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$	C_{litter}	$\delta^{13}\text{C}_{\text{litter}}$	C_{soil}
$\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$	-0.359	1			
C_{litter}	0.809 **	-0.226	1		
$\delta^{13}\text{C}_{\text{litter}}$	-0.516	0.350	-0.324	1	
C_{soil}	0.072	-0.040	0.293	-0.098	1
$\delta^{13}\text{C}_{\text{soil}}$	-0.084	0.001	0.097	0.055	0.080

C_{leaf} : 叶片碳含量 Leaf C concentration; $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$: 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度 Leaf $\delta^{13}\text{C}$; C_{litter} : 凋落物碳含量 Litter C concentration; $\delta^{13}\text{C}_{\text{litter}}$: 凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度 Litter $\delta^{13}\text{C}$; C_{soil} : 土壤碳含量, Soil C concentration; $\delta^{13}\text{C}_{\text{soil}}$: 土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度 Soil $\delta^{13}\text{C}$; ** 为极显著差异 ($P<0.01$)

3 讨论

3.1 同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度的分布格局与生态学意义

碳稳定同位素已被用于研究生态系统过程中的生态学效应和生物圈碳循环特征。物种水平上,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 能够表征植物光合作用过程中的水分利用效率,指示固碳耗水成本^[18-19],也能评价植物对逆境的适应能力^[20],这些理论能够为黔西北地区高寒、干旱生境下植被恢复树种选择提供科学依据。通常,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 越大,水分利用效率越高,固碳耗水成本越低,固定相同数量的碳所消耗的水分更少。由图 1 可知,黔西北地区马桑、刺梨、栓皮栎等优势树种的水分利用效率较高,表明该区域灌木树种具有更高的水分利用效率,光合固碳耗水成本相对较低,适应水分胁迫生境的能力较强。研究区内水土流失严重、土层浅薄、水资源年际与年内分布不均,导致植物对干旱胁迫产生忍耐适应。随着干旱胁迫加剧,植物为了充分利用水分,采取关闭气孔、减小气孔导度和降低蒸腾的策略,导致胞间 CO_2 浓度降低,植物可选择吸收的 CO_2 减少,引起 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大^[21],提高了水分资源的利用程度和效率,表明 $\delta^{13}\text{C}$ 值能较好地指示植物水分利用状况^[22]。刺梨是该区域大面积培育的生态经济树种,由于对生境的适应能力强和对水资源的利用效率高,目前正在逐步扩大推广种植,但是水分胁迫下如何提高养分利用效率是下一步应该关注的科学问题。

土壤有机质的源物质大部分来自生长于地表的植被,包括植物残体和根系分泌物等,根系加快了有机质

的循环和周转,可以依据植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值判断土壤有机质的来源,研究植被动态演替过程^[23]。土壤有机质及其稳定同位素组成能够揭示生态系统碳循环的关键信息,有助于研究全球变化下陆地生态系统的碳动态与碳资源的可持续利用^[2]。碳同位素自然丰度可以表征土壤碳库的微小迁移和变迁,指示环境的碳储量变化^[24]。本研究中,光皮桦、金丝桃等优势树种的根区土壤较其他土壤具有更加丰富的有机碳资源,华山松、火棘等树种的根区土壤有机碳资源相对稀缺,原因是光皮桦为落叶树种,金丝桃多为生长在光皮桦等乔木下层的灌木树种,蕴含较多植物残体,经多种生化作用及其微生物分解,为表土输入充足的有机物质,导致有机碳的含量较高;而华山松等针叶凋落物分解代谢速率较慢,火棘凋落物数量较少,有机质的回归量较少,导致有机碳含量偏低。结果表明针阔混交林和复层林分有助于提高土壤有机碳含量,这为造林模式的构建奠定了科学依据。

土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正,表明有机质的分解更加彻底^[11],本文研究结果暗示川榛、刺梨、火棘等优势树种的根区土壤分解更彻底,土壤有机碳滞留时间增加,表明不同树种对资源的利用程度各异,对生境表现出特有的适应策略。黔西北地区土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -25.5‰ ,较青海高寒草甸土壤的 -24.78‰ ^[25]、黄土高原草地土壤的 -25.0‰ ^[26]偏负,较长白山森林土壤的 -28.67‰ — -27.15‰ 偏正^[12],可能是地表植物系统和气候差异所致,本研究区处于喀斯特高原山地,植被类型主要为针阔混交林和阔叶林。决定土壤有机质差异的主要因素有 C_3 和 C_4 植物^[27], C_3 型植物有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -23‰ — -35‰ ,平均值约为 -27‰ ; C_4 型植物有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -9‰ — -19‰ ,平均值约为 -13‰ ^[28],因此黔西北地区主要植被类型是 C_3 植物。该区有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低值与最高值之间的差异为 4.3‰ ,表明该区植被和气候发生过很大变化的可能性较小。本研究丰富了黔西北地区碳资源的研究,但是还需要深化植被和环境的交互效应对碳循环过程动态变化的影响研究,加强碳资源的可持续利用。

3.2 不同垂直层次同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间的关系

土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值较叶片偏低,这与他人的研究结果不一致^[2,29],亦与 ^{13}C 更多进入土壤微生物量碳中并最终补充进入到土壤有机碳的原理不符,原因可能是根区土壤有机碳同时受到优势树种和其他伴生树种凋落物分解的影响,具有聚集效应,而土壤样本较难清晰地分辨出物种,这也给分析带来不确定性因素。此外, $\delta^{13}\text{C}$ 在土壤中的分馏过程反映了土壤有机质来源和分解过程中碳同位素分馏效应的强度,上升幅度越大则分馏效应强度越大,指示有机质分解的程度越高^[30],土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏高的原因也可能与其分解程度有关。土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈正相关关系,这与 Balesdent 等^[6]的研究结果一致,验证了森林土壤有机质主要来源于植被层,但是相关性不显著,表明土壤并不能完全继承凋落物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,原因是土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值是新碳和老碳混合作用的结果,具有同位素混合效应^[31],且存在有机碳向无机碳的转换过程^[32],同时也与根区土壤并非完全继承优势树种凋落物碳有关。本文研究结果表明了保护凋落物层对森林土壤肥力具有重要意义,该区凋落物受人为伐薪等行为影响,采掘量较大,应加强原位保护。全球碳循环的途径之一是通过陆地生物将植物残留物转换为土壤有机质,有机质的矿质化和腐殖化过程参与了元素循环,因此植物残留物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值对于土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有影响。本文研究还发现,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间呈现正相关关系,但不显著,原因可能是植物叶片碳含量受到植物功能型、气候因子等制约,土壤碳含量则受到土壤质地和植物功能型等驱动^[12],亦即主控因子不完全一致是造成二者相关关系不显著的原因。影响土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度变化的因素很多,被认为是诸多因素交互作用的结果,可能与植被更替、群落演替过程中的新碳与老碳混合效应有关,也可能与有机质分解的阶段性的有关^[1]。上述结果表明碳同位素示踪方法为研究长时间尺度的土壤有机碳动态过程提供了一个强有力的工具,能够示踪土壤有机碳的来源、循环和转化过程,并受到不同研究尺度的影响。

3.3 对植被恢复的启示

土壤碳库包括有机碳库和无机碳库两部分,在全球碳循环中发挥着关键作用^[33],森林是陆地生态系统的主体,植被恢复有利于土壤碳蓄存和周转。黔西北地区天然次生林植被受人为干扰较大,表现出退化趋势,次生林比重较大,组成、结构和功能均发生与原有演替相反或偏移的量变或质变,影响了森林生态系统的生产力

和固碳潜力,开展植被恢复和可持续经营具有重要的现实意义。从林相上看,黔西北地区应经营针阔混交林,增加落叶阔叶树种,构建固碳型植被配置模式,增加土壤有机碳资源,以加速土壤碳周转速率,增强植物的适应能力,提高生物多样性水平。从树种选择上,可以配置马桑、刺梨、栓皮栎等水分利用效率高的树种,优化森林植被垂直和水平空间结构,创造适宜的水分生态位,防止生态位过度重叠和分离。从森林植被原位保护上,应保护好森林凋落物层尤其是新鲜凋落物层(新碳的主要来源),提高其蓄积量,促进生态系统碳元素循环,为土壤生物提供充足的碳源、氮源等物质。今后可以加强优势树种适应水分功能群和固碳释氧功能群的研究,模拟未来气候变化情景,精确定量化地阐述不同生态系统类型碳汇的强度和寿命,识别有利于碳库存和循环的植被恢复模式。同时,物种与群落之间有机质稳定碳同位素特征的尺度效应与转换也值得研究,这对基于建群种和优势种的植被恢复具有重要的理论和实践价值,能够降低林分结构优化配置工作的复杂性。

4 结论

(1) 14个优势树种叶片、凋落物碳含量总体变化规律均为针叶树种较高、常绿灌木较低,叶片、凋落物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值随生活型的变化规律均不明显;根区土壤碳含量以光皮桦、银白杨等落叶乔木较高, $\delta^{13}\text{C}$ 值以川榛最高、马桑和核桃最低。

(2) 黔西北主要植被类型是 C_3 植物,该区有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低值与最高值之间的差异为 4.3‰,暗示该地区植被和气候在过去发生极大变化的可能性较低。

(3) 叶片、凋落物和土壤层各层次碳含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间均呈不显著相关;不同层次的 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度之间和碳含量之间均为正相关,但仅叶片层、凋落物层碳含量之间呈显著相关。

(4) 黔西北地区植被恢复应营造针阔混交林,选择水分利用效率高的树种并保护好凋落物层。

参考文献 (References):

- [1] 熊鑫,张慧玲,吴建平,褚国伟,周国逸,张德强. 鼎湖山森林演替序列植物-土壤碳氮同位素特征. 植物生态学报, 2016, 40(6): 533-542.
- [2] 陈新,贡璐,李杨梅,安申群,赵晶晶. 典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征. 环境科学, 2018, 39(10): 4735-4743.
- [3] Bhattacharya S S, Kim K H, Das S, Uchimiya M, Jeon B H, Kwon E, Szulejko J E. A review on the role of organic inputs in maintaining the soil carbon pool of the terrestrial ecosystem. Journal of Environmental Management, 2016, 167: 214-227.
- [4] Tambussi E A, Bort J, Araus J L. Water use efficiency in C_3 cereals under Mediterranean conditions: a review of physiological aspects. Annals of Applied Biology, 2007, 150(3): 307-321.
- [5] 赵丹,程军回,刘耘华,刘利利,李瑞霞,盛建东. 荒漠植物梭梭稳定碳同位素组成与环境因子的关系. 生态学报, 2017, 37(8): 2743-2752.
- [6] Balesdent J, Girardin C, Mariotti A. Site-related $\delta^{13}\text{C}$ of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. Ecology, 1993, 74(6): 1713-1721.
- [7] Michener R H, Lajtha K. Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science. 2nd ed. Malden, MA: Blackwell, 2007: 1-594.
- [8] Nakane K. A simulation model of the seasonal variation of cycling of soil organic carbon in forest ecosystems. Japanese Journal of Ecology, 1980, 30(1): 19-29.
- [9] Wang Z C, Liu S S, Huang C, Liu Y Y, Bu Z J. Impact of land use change on profile distributions of organic carbon fractions in peat and mineral soils in northeast China. CATENA, 2017, 152: 1-8.
- [10] 李龙波,刘海泽,李晓东,刘文景,刘丛强. 贵州喀斯特地区典型土壤有机碳垂直分布特征及其同位素组成. 生态学报, 2012, 31(2): 241-247.
- [11] 赵云飞,汪霞,欧延升,洪苗苗,黄政,李佳,贾海霞. 若尔盖草甸退化对土壤碳、氮和碳稳定同位素的影响. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1405-1411.
- [12] 司高月,李晓玉,程淑兰,方华军,于贵瑞,耿静,何舜,于光夏. 长白山垂直带森林叶片-凋落物-土壤连续体有机碳动态——基于稳定性碳同位素分析. 生态学报, 2017, 37(16): 5285-5293.
- [13] Walker X J, Mack M C, Johnstone J F. Stable carbon isotope analysis reveals widespread drought stress in boreal black spruce forests. Global

- Change Biology, 2015, 21(8): 3102-3113.
- [14] 李开萍, 刘子琦, 李渊, 肖杰, 董晓超, 曹洋. 贵州毕节地区不同石漠化程度土壤理化性质特征. 水土保持学报, 2017, 31(4): 205-210.
- [15] 关智宏, 熊康宁, 顾再柯, 陈永毕. 撒拉溪喀斯特土地整理区动植物物种多样性. 湖北农业科学, 2016, 55(6): 1433-1440.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2008: 74-271.
- [17] 喻阳华, 李光容, 皮发剑, 严令斌, 喻理飞, 黄宗胜. 赤水河上游水源涵养树种的水分生理特征. 水土保持学报, 2015, 29(4): 201-206.
- [18] Ripullone F, Lauteri M, Grassi G, Amato M, Borghetti M. Variation in nitrogen supply changes water-use efficiency of *Pseudotsuga menziesii* and *Populus x euroamericana*; a comparison of three approaches to determine water-use efficiency. Tree Physiology, 2004, 24(6): 671-679.
- [19] Yu G R, Song X, Wang Q F, Liu Y F, Guan D X, Yan J H, Sun X M, Zhang L M, Wen X F. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic Variables. New Phytologist, 2008, 177(4): 927-937.
- [20] 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. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(24): 23685-23694.
- [21] 刘莹, 李鹏, 沈冰, 冯朝红, 刘琦, 张祎. 采用稳定碳同位素法分析白羊草在不同干旱胁迫下的水分利用效率. 生态学报, 2017, 37(9): 3055-3064.
- [22] Zheng L J, Ma J J, Sun X H, Guo X H, Jiang J, Ren R, Zhang X L. Responses of photosynthesis, dry mass and carbon isotope discrimination in winter wheat to different irrigation depths. Photosynthetica, 2018, 56(4): 1437-1446.
- [23] Kingston J D, Hill A, Marino B D. Isotopic evidence for neogene hominid paleoenvironments in the Kenya Rift Valley. Science, 1994, 264(5161): 955-959.
- [24] Guo Q J, Zhu G X, Chen T B, Yang J, Yang J X, Peters M, Wei R F, Tian L Y, Han X K, Hu J. Spatial variation and environmental assessment of soil organic carbon isotopes for tracing sources in a typical contaminated site. Journal of Geochemical Exploration, 2017, 175: 11-17.
- [25] Boutton T W, Archer S R, Midwood A J, Zitzer S F, Bol R. $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem. Geoderma, 1998, 82(1/3): 5-41.
- [26] 全小龙, 段中华, 乔有明, 裴海昆, 陈梦词, 何桂芳. 不同高寒草甸土壤碳氮稳定同位素和密度的差异. 草业学报, 2016, 25(12): 27-34.
- [27] 李龙波, 涂成龙, 赵志琦, 崔丽峰, 刘文景. 黄土高原不同植被覆盖下土壤有机碳的分布特征及其同位素组成研究. 地球与环境, 2011, 39(4): 441-449.
- [28] Deines P. The isotopic composition of reduced organic carbon//Fritz P, Fontes J C, eds. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Amsterdam; Elsevier, 1980: 329-406.
- [29] de Rouw A, Soullileuth B, Huon S. Stable carbon isotope ratios in soil and vegetation shift with cultivation practices (Northern Laos). Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 200: 161-168.
- [30] 陈庆强, 沈承德, 孙彦敏, 彭少麟, 易惟熙, 李志安, 姜漫涛. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制. 土壤学报, 2005, 42(1): 1-8.
- [31] Liao J D, Boutton T W, Jastrow J D. Organic matter turnover in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland: Evidence from natural ^{13}C and ^{15}N . Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(11): 3197-3210.
- [32] 李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新. 基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移. 环境科学, 2018, 39(8): 3867-3875.
- [33] 余健, 房莉, 卞正富, 汪清, 俞元春. 土壤碳库构成研究进展. 生态学报, 2014, 34(17): 4829-4838.