

喀斯特区不同岩性发育的土壤上植物—枯落物—土壤系统 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征

邹军¹, 喻理飞^{2,3}, 李媛媛⁴, 黄宗胜¹

(1.贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2.贵州大学生命科学院, 贵阳 550025; 3.山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 山地生态与农业生物工程协同创新中心, 贵阳 550025; 4.贵州省植物园, 贵阳 550004)

摘要: 为了解喀斯特区不同岩性发育的土壤上林分碳元素循环特征, 采用稳定碳同位素技术, 研究贵州省喀斯特区白云岩、白云质砂岩、石灰岩 3 种岩性发育的土壤上猴樟(*Cinnamomum bodinieri*)、柏木(*Cupressus funebris*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、光皮桦(*Betula luminifera*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)和圆果化香(*Platycarya longipes*) 6 种树种为优势种构建的林分的优势种植物—枯落物—土壤系统 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化和土壤有机质更新。结果表明: (1) 部分树种在不同岩性上的 $\delta^{13}\text{C}$ 存在差异, 石灰岩上柏木 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其他岩性呈极显著性差异($P < 0.001$), 桤木在石灰岩与白云岩上呈显著性差异($P = 0.024$); 不同树种表现为猴樟、柏木、马桑 3 个树种相互间或与其他树种多表现出显著性或极显著差异($P < 0.05$ 或 $P = 0.001$); 树种各器官 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈叶片 $<$ 枝干 $<$ 根的分配格局。(2) 3 种岩性上, 各树种林分变化规律基本一致, 均为植物叶片(新鲜枯落物) $<$ 枯落物分解层 $<$ 枝干 $<$ 根 $<$ 上层土壤 $<$ 下层土壤。土壤层与植物体、枯落物之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在极显著差异($P < 0.001$), 土壤层与枯落物层比较, 增幅较大的是白云质砂岩上的猴樟林和柏木林, 分别为 11.68‰, 11.10‰, 增幅较小的是白云岩上的马桑林和石灰岩上的桤木林, 分别为 1.07‰, 2.73‰。(3) 土壤有机质更新率最大为白云岩上马桑林 43.84%, 其次为石灰岩上桤木林 34.17%, 最低为石灰岩上的圆果化香林 1.15%。白云岩上植物群落的有机碳周转率回归方程斜率 K 值为 3.15, 石灰岩上为 0.85。白云质砂岩上林分的有机碳含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值无相关性。研究结果对揭示喀斯特地区 C 元素循环及迁移特征和养分迁移特征具有重要意义。

关键词: $\delta^{13}\text{C}$ 值; 植物—枯落物—土壤系统; 优势树种; 岩性; 喀斯特区

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0186-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.027

Changes in $\delta^{13}\text{C}$ Value of Plant-litter-soil System in Soils Developed from Different Lithologies in Karst Area

ZOU Jun¹, YU Lifei^{2,3}, LI Yuanyuan⁴, HUANG Zongsheng¹

(1.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; 2.College of Life

Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025; 3.Key Laboratory for Mountain Plant Resources

Protection of the Education Ministry of China, Guiyang 550025; 4.Gui Zhou Botanical Garden, Guiyang 550004)

Abstract: In order to understand the C cycle characteristics in dominant tree communities in soils developed from different lithologies in Karst area, the $\delta^{13}\text{C}$ value and soil organic matter renewal of various tree species communities were measured for six woody species (cypress, *Cupressus funebris*; mansur shrub, *Coriaria nepalensis*; camphor, *Cinnamomum bodinieri*; birch, *Betula luminifera*; alder, *Alnus cremastogyne* and dyetree, *Platycarya longipes*) planted in three different lithologic soil types (dolomite, dolomite sandstone, limestone) in the karst area of Guizhou Province. Results showed that: (1) Changes of $\delta^{13}\text{C}$ values in plant species in different lithologies, the $\delta^{13}\text{C}$ value of *cypress funebris* on limestone had very significant difference with other lithologies ($P < 0.001$), *Alnus cremastogyne* had significant difference in limestone and dolomite ($P = 0.024$). There were significant or extremely significant differences among three tree species (*Cinnamomum bodinieri*, *Cupressus funebris*, *Coriaria nepalensis*), or with other tree species ($P < 0.05$ or $P = 0.001$). The $\delta^{13}\text{C}$ values of each organ in tree species were leaf $<$ branch $<$ root. (2) Changes of $\delta^{13}\text{C}$ values in plant-litter-soil system; on the three lithologies, the change law of community of each tree species was

收稿日期: 2019-06-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(31560187); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502604); 贵州省重大专项(黔科合 JZ 字[2014]2002)

第一作者: 邹军(1979—)男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事植物群落营养循环研究。E-mail: linzouju@163.com

通信作者: 喻理飞(1963—), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特植被恢复研究。E-mail: lifeiuygd@163.com

basically the same, that is, plant leaves (fresh litter) < litter decomposition layer < branch < root < upper soil < lower soil. There was a significant difference in $\delta^{13}\text{C}$ values between soil layer and plant and litter ($P < 0.001$). Compared with litter layer, the increased degree of community of *Cinnamomum bodinieri* and *Cupressus funebris* on dolomitic sandstone was larger, 11.68‰ and 11.10‰ respectively, while the increased degree of *Coriaria nepalensis* on dolomite and *Alnus cremastogyne* on limestone was smaller, by 1.07‰ and 2.73‰, respectively. (3) Renewal rate of soil organic matter: the highest was the community of *Coriaria nepalensis* on dolomite, 43.84%, followed by the community of *Alnus cremastogyne* on limestone, 34.17%, and the lowest was the community of *Platycarya longipes* on limestone, 1.15%. Organic carbon turnover showed that the slope K of regression equation of dolomite plant community was 3.15, followed by plant communities on limestone was 0.85. The organic carbon contents were not correlated with $\delta^{13}\text{C}$ values in dolomitic sandstone. The results of the study would be of great significance to reveal the characteristics of C cycle, migration and nutrient transfer in different plant communities in lithologies of karst area.

Keywords: $\delta^{13}\text{C}$ value; plant-litter-soil system; dominant tree species; the lithology; Karst area

碳是构成生命物质的主要元素,约占干重的 50%,碳循环作为森林生态系统的重要功能之一,调节和维持着生态系统的生产力与稳定性^[1]。土壤中有有机碳主要以有机质的形式存在,所以研究土壤有机质特征和有机碳动态对认识土壤碳库动态、有机碳循环具有重要作用^[2]。近年来,碳同位素已成为研究生态系统 C 循环的精确、可靠的技术。植物的光合作用及其形成的碳水化合物在其代谢、分配过程中发生碳同位素分馏,因此植物体内不同器官和成分间都具有较大差异的碳同位素自然丰度^[3]。植物的各种器官最终以凋落物的形式进入土壤,但各种器官中各组分的分解速率不同,一般轻同位素含量高的组分更易分解,使未分解的部分出现 ^{13}C 富集^[4]。随着有机质逐年积累分解,新土壤逐渐形成,土壤有机质的 ^{13}C 含量随着土层深度增加而增加^[5]。土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 沿深度增加的典型分布格局,可用来指示土壤中碳的来源及周转速率^[6],已有研究^[7-8]表明,生态系统的稳定碳同位素组成可以用来指示生态系统碳循环的过程、机制和变化规律, $\delta^{13}\text{C}$ 值特征在土壤碳循环过程中,能有效阐明土壤有机质的分解程度,土壤碳动态变化和含量的微小迁移与转换,以及评估新老土壤有机碳对碳储量的相对贡献。因此,植物—枯落物—土壤系统 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化对了解喀斯特区森林生态系统功能及物种对生境适应性等具有重要意义。目前,利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化在长白山森林叶片—凋落物—土壤连续体有机碳动态^[9]、凋落叶 DOM 对林地土壤有机碳矿化激发效应^[10]及荒漠植物白刺对新固定碳在植物—土壤系统中的分配^[11]等方面开展了研究。喀斯特区土壤剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 值已有研究^[2,7],初步得出了喀斯特区土壤剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征。然而,喀斯特区土壤由不同岩性的母岩发育形成,如石灰岩主要由方解石(CaCO_3)组成,白云岩主要由白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)组成,白云岩岩化过程中,MgO 和 CaO 含量比例从低变高^[12],岩石中

Si、Al、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、Kr、Ba、Ni 元素的形成和分解受到环境影响很大^[13-14]。不同矿物组成和不同结构的岩石,其风化所形成的土壤在理化性质、土层厚度等方面产生差异,对植物的生长和生理活动产生较大影响,会形成不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,而 $\delta^{13}\text{C}$ 值在喀斯特森林植物—枯落物—土壤系统中的变化规律研究较少,特别是不同岩性上森林植物—枯落物—土壤系统 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征还未见报道。

本文采用碳同位素的方法,选取贵州分布面积较大的石灰岩、白云岩、白云质砂岩 3 种岩性发育土壤上生长的林分,选择柏木、猴樟、马桑、光皮桦、桉木、圆果化香 6 个常见造林树种为优势种构建的林分。测定不同岩性上所选树种的各个器官、枯落物、林分土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,揭示有机碳在各林分及其土壤中的变化特征,了解碳元素的迁移与转化,为喀斯特地区碳元素循环转化及养分迁移转化特征提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究区选择依据贵州碳酸盐岩组的分布^[15],在其他环境背景基本一致的条件下,选择 3 种岩性充分发育地点作为研究样区(表 1),利用贵州省森林资源二类调查数据及实地调查,选择各岩性上的优势树种,以优势种构建的林分代表所选树种整体林分特征。其中,猴樟、柏木、马桑 3 个优势种在 3 种岩性中均有,其余优势种确保在 2 种岩性上有。

1.2 样品采集

群落调查:2017 年 6—9 月,在预选研究区,在白云岩、白云质砂岩、石灰岩 3 种岩性发育的土壤上选择林龄和林分特征尽量一致的纯林林分,采用常规群落调查方法,乔木样地面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,灌木样地面积为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,每种树种林分选择 3 块样地。

树种器官样品采集:在所选树种群落样地中,每个样地选取 1 株平均木作为样树,采集鲜叶和秆、枝、根样品,用于各器官 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定。叶片采集:在树冠中上层分东南西北 4 个方位,分别选取伸展枝条为标准枝,在标准枝上采摘 20 片新鲜叶片,每株样树共 80 片鲜叶混合。每个岩性上,每个树种取 3 株样树,共取 6 个树种计 45

个叶片样品。枝杆、根样品采集:按上述选取树株为样树,每岩性每种树选取 3 株样树,将样树连根挖出,分别于秆、枝、根上用刀、锯采集 50 g 左右样品(枝、杆样品混合),杆枝、根样品各取 45 个,取样完成后将样品装入有透气性的袋子带回,将带回的样品清洗、烘干、冷却、粉碎,过 20 目筛后装入封口袋待测^[16]。

表 1 3 种岩性群落样地特征

岩性	样地地理区域	研究区概况	样地类型	样地基本特征
白云岩	东:106°35′29″E 西:106°33′21″E 南:26°49′44″N 北:26°51′37″N	位于贵州省贵阳市修文县龙场镇沙溪村修文河右岸,海拔 1 100~1500 m,年平均温 16.5 ℃,≥100 ℃活动积温 4 097.40 ℃,年平均降水量 1100 mm,全年日照时间 1 359.4 h,属亚热带季风气候区。土层石砾含量高,土层浅薄,土壤以白云质灰岩为主发育的黄壤和黑色石灰土。现存植被为各种次生乔林、灌木林,藤刺灌丛,植被盖度 80%	桉木林	海拔 1 350 m,西北向,坡度 25°,土壤为黄壤,人工纯林,树龄 15 年。群落结构较简单,具乔灌木层,乔木层为桉木,高 5~8 m。其覆盖度为 30%
			柏木林	海拔 1 414 m,东北向,坡度 40°,土壤为黑色石灰土,人工纯林,树龄 16 年。群落结构简单,乔木层主要为柏木,高 5~8 m,覆盖度为 30%
			马桑灌丛	海拔 1 283 m,东北向,坡度 10°,土壤为黄壤,次生天然林,树龄 10 年。层次结构较简单,灌木仅为马桑和一些藤刺,高度 1.5~3 m,覆盖度占 60%
			猴樟林	海拔 1 358 m,东向,坡度 25°,土壤为石灰土,人工纯林,树龄 16 年。群落结构简单,乔木层为猴樟,高度为 4~8 m,覆盖度为 80%
白云质砂岩	东:107°59′08″E 西:107°56′48″E 南:26°33′53″N 北:26°34′40″N	位于贵州省东南部的凯里市凯棠镇,海拔 523~1 233 m。年平均气温 13.6~16.2 ℃,1 月平均气温 2.6~5.2 ℃,年均日照时间 1 289.1 h,年均降水量 1 240.4 mm,年均相对湿度 78%,无霜期 288 d。属中亚热带温暖湿润季风气候区,土壤主要为石灰土、黄棕壤。现存植被主要为天然次生林和人工林	圆果化香林	海拔 668 m,东北向,坡度 38°,土壤为石灰土,次生天然林,树龄 13 年左右。群落结构单一,灌木主要是圆果化香,平均高度 1.8 m。覆盖度为 55%
			马桑灌丛	海拔 622 m,东南向,坡度 30°,土壤为黄色石灰土,次生天然林,树龄 10 年。层次结构单一,主要为灌木层,灌木仅有马桑,高度为 2.5~3 m。覆盖度占 30%
			猴樟林	海拔 615 m,东向,坡度 38°,土壤为黄色石灰土,人工纯林,树龄 13 年左右。群落结构比较简单,高度为 2.5~6 m,乔木层覆盖度为 30%
			柏木林	海拔 626 m,南向,坡度 30°,土壤为石灰土,人工纯林,树龄 20 年左右。群落层次结构完整,乔木层最为发达,高 5~8 m,其覆盖度为 75%
石灰岩(stone)	东:105°34′09″E 西:105°28′03″E 南:25°46′52″N 北:25°55′59″N	位于贵州省安顺市关岭县永宁镇和普利乡,海拔 800~1 500 m。年平均气温为 16.2 ℃,年平均最高气温为 16.9 ℃,最低气温 15.4 ℃,雨量充沛,年降水量 1 205.1~1 656.8 mm。该区主要以中亚热带季风湿润气候为主,四季分明,雨热同季。土壤主要有石灰土、黄棕壤等。现存植被主要为天然次生林和人工林	马桑灌丛	海拔 1 230 m,东北向,坡度 25°,土壤为黄棕壤,次生天然林,树龄 10 年。层次结构较完整,主要为灌木层及草本层,高度为 1.5~3 m,灌木覆盖度占 45%
			光皮桦林	海拔 1 404 m,东北向,坡度 10°,土壤为黄棕壤,次生天然纯林,树龄 16 年。群落结构较简单,乔木层为光皮桦,高度为其覆盖度为 40%
			圆果化香林	海拔 1 581 m,南向,坡度 60°,土壤为石灰土,次生天然林,树龄 14 年左右。群落结构单一,灌木层主要是圆果化香,平均高度 1.8 m,覆盖度为 30%
			猴樟林	海拔 1 432 m,东南向,坡度 15°,土壤为石灰土,人工纯林,树龄 16 年左右。群落结构单一,高度为 2.5~5 m。乔木层覆盖度为 50%
			柏木林	海拔 1 545 m,东北向,坡度 45°,土壤为黑色石灰土,人工纯林,树龄 16 年左右。群落层次结构简单,有少量灌木,柏木高 4~8 m,覆盖度为 40%
			桉木林	海拔 1 468 m,东北向,坡度 25°,土壤为黄棕壤,天然纯林,树龄 20 年左右。群落结构较简单,乔木层为桉木,高 8~15 m,其覆盖度为 50%

枯落物采集:2017 年 10—11 月,用收集网收集林中样地枯落物,用 20 目的尼龙网制成 1 m×1 m 收集框,悬挂在样地林分中或置放于林地上,每个样地 1 个收集框,每个树种林分按“品”字形放置 3 个收集框,共收集 45 个新鲜枯落物样品。带回洗净、烘干、粉碎。半分解层收集:在每个林分样地中设置 1 m×1 m 样方,刨开新鲜枯落物层,贴近土壤层,收集具有明显分解状态的枯落物,共收集 45 个样品,带回烘干、粉碎备用。

土壤样品采集:由于研究区属典型喀斯特区,岩石裸露率高,土层浅薄,生境破碎,在样地内按梅花状或“S”形取样,分 0—20 cm、根际土、20—40 cm 取样。取

样用取样锄头、铁铲挖出剖面,先取 20—40 cm 土层土壤,然后取 0—20 cm 土壤,根际土取上层土中树根上或附近壤土。每个样地选择 5 个点取样分层混合。每种岩性上每个树种林分样地每个土层取 3 个混合土样,共取 135 个样品,取毕带回实验室后风干、磨细,分别过 0.5,0.2 mm 筛,储于广口瓶。将过 0.5 mm 筛的土壤样品用 1 mol/L 盐酸除去土壤中的无机碳,用去离子水充分洗净样品中过量盐酸备测。

1.3 测定方法

2017 年 12 月,将酸化后的土壤样品,植物器官及枯落物样品送至国家海洋局第三海洋研究所稳定同位素质谱实验室测定,仪器型号为 TC/EA—

IRMS(Delta V advantage),采用 PDB(Pee Dee Bel-
emnite)标准,测量误差 $<0.05\text{‰}$ 。

$\delta^{13}\text{C}$ 值计算依据国际通用标准形式^[17],计算公式为:

$$\delta^{13}\text{C}=[(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}-(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}]/(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}\times 1000\text{‰}$$

式中: $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}}$ 为样品的碳同位素比率; $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}$ 为标准的 PDB 同位素比率。

过 0.2 mm 筛的土壤样品用于测定土壤有机质和全氮含量,有机质含量采用常规重铬酸钾氧化—外加加热法测定,土壤全氮采用半微量开氏法^[18]测定,pH 采用常规 pH 计测定。

1.4 有机质更新率和有机碳周转率

有机质更新率:土壤有机质的分解将引起土壤碳同位素比率发生改变,因此,土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随着土层深度的变化可近似地反映土壤有机质的分解特征^[19],本文用不同林分的优势树种对上层土壤有机质输入的影响,以土壤上下层(即 0—20,20—40 cm) $\delta^{13}\text{C}$ 值变化来揭示土壤自下层至上层有机质的更新率,用土壤有机质更新率公式^[20],计算公式为:

$$f=\frac{(\delta-\delta_b)}{(\delta_p-\delta_b)}$$

式中: f 为经过时间 t 后上层土壤有机质来自林分优势树种的有机质所占比例即土壤有机质更新率(‰); δ_b 为

起始土壤(下层)有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(‰); δ_p 为林分优势种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(‰); δ 为经过时间 t 后土壤(上层)有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)。

有机碳周转率:采用一元回归分析方法研究土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 SOC 含量自然对数值(log SOC)之间的关系,根据回归方程斜率值 K 来评价 3 种岩性上各种植物群落 SOC 的周转率^[9]。

1.5 数据处理

数据处理采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件统计分析,对岩性间、树种间及不同部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和相关性分析(CA),显著性水平 $\alpha=0.05$,作图采用 Excel 2013、Origin 8.6 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤 C/N、pH 和有机碳含量剖面分布特征

C/N 是土壤有机质组成结构的重要指标,而土壤 pH 主要是通过对微生物群落直接影响而对凋落物分解产生间接影响。由表 2 可知,3 种岩性发育的土壤 0—20 cm 到 20—40 cm 层次的 C/N 值存在显著性差异,上层土壤碳含量较为丰富,从上至下,碳元素逐渐分解。由表 3 可知,3 种岩性发育的土壤呈微酸性至碱性,多数土壤呈碱性,白云质砂岩土壤“偏酸”,而白云岩和石灰岩土壤呈微碱性。

表 2 3 种岩性优势树种群落土壤 C/N

岩性	土层深度/cm	柏木	猴樟	马桑	光皮桦	桤木	圆果化香
白云岩	根际土	11.05±0.09A	11.75±0.11A	10.87±0A	16.70±0.05A	9.14±0.01A	——
	0—20	11.31±0.08A	10.01±0.02B	11.27±0.04A	17.09±0.01A	11.61±0.06B	——
	20—40	10.72±0.04B	11.33±0A	9.17±0.06B	12.52±0.08B	8.96±0.01A	——
白云质砂岩	根际土	11.75±0.01A	12.17±0.08A	10.70±0A	——	——	13.81±0.03A
	0—20	11.75±0.06A	11.20±0.05B	10.65±0.04A	——	——	13.98±0.07A
	20—40	11.43±0.02A	11.60±0.05B	9.40±0B	——	——	10.08±0.01B
石灰岩	根际土	10.84±0.07A	10.26±0.04A	11.33±0A	10.27±0.02A	12.11±0.03A	11.9±0.03A
	0—20	10.60±0.06A	10.92±0.01A	10.30±0.01A	10.58±0.01A	11.67±0.04A	11.17±0.02A
	20—40	9.45±0B	9.59±0B	8.24±0.02B	7.16±0.01B	10.56±0.05B	8.59±0B

注:表中数据为平均值±标准差, $n=6$;同列不同大写字母表示同一岩性、不同土层间显著差异($P<0.05$);——表示该树种在本岩性上不存在。下同。

表 3 3 种岩性优势树种群落土壤 pH

岩性	土层深度/cm	柏木	猴樟	马桑	光皮桦	桤木	圆果化香
白云岩	根际土	7.43±0.01	7.35±0	6.28±0.03	7.68±0.08	6.23±0.11	——
	0—20	7.31±0.02	7.03±0.24	5.34±0.08	7.36±0.73	5.25±0	——
	20—40	7.02±0	6.83±0.31	5.06±0.94	7.04±0.02	4.97±0.33	——
白云质砂岩	根际土	6.83±0.09	5.74±0.06	5.80±0.44	——	——	7.84±0.52
	0—20	6.83±0.04	5.51±0.17	5.56±0.30	——	——	7.37±0.11
	20—40	6.44±0.01	5.18±0.21	5.32±0.05	——	——	6.44±0
石灰岩	根际土	7.91±0.01	7.48±0.76	6.21±0.17	6.27±0	7.60±0.37	7.40±0.66
	0—20	7.83±0.41	7.01±0.51	5.41±0.06	6.48±0.22	6.75±0.13	7.45±0.16
	20—40	7.42±0.94	6.53±0.33	5.22±0.11	5.88±0.36	6.73±0.04	7.38±0.65

由表 4 可知,白云质砂岩土壤有机碳含量总体上低于其他 2 种岩性的土壤,白云岩 20—40 cm 土壤较其他 2 种岩性低。马桑林、桉木林、石灰岩上光皮桦林有机碳含量较其他林分低,其林分土壤多为黄壤或黄棕壤土,土壤呈酸性而黏重。有机碳在岩性之间存在差异,柏木林土壤在不同岩性间存在极显著差异

($P<0.001$);圆果化香林土壤在石灰岩和白云质砂岩上存在极显著性差异($P<0.001$);桉木林在石灰岩和白云岩上存在极显著差异($P<0.001$);马桑林在白云质砂岩上与其他 2 种岩性表现出极显著差异($p<0.001$)。而在石灰岩和白云岩之间无显著性差异。其他树种林分有机碳在岩性间没有显著性差异。

表 4 3 种岩性上优势树种群落土壤有机碳含量

岩性	土层深度/cm	优势树种有机碳含量/(g·kg ⁻¹)					
		柏木	猴樟	马桑	光皮桦	桉木	圆果化香
白云岩	根际土	59.63±1.10Aa	35.46±0.54Aa	30.77±1.22Aa	50.31±0.94Aa	14.98±0.03Aa	——
	0—20	63.51±0.81Aa	22.50±0.04Ba	31.89±0.91Aa	34.58±1.31Ba	23.57±0.21Ba	——
	20—40	17.89±0.02Ba	19.60±0.06Ba	7.54±0.06Ba	15.78±0.84Ca	8.90±0Aa	——
白云质砂岩	根际土	35.41±0.05Ab	31.08±1.01Aa	18.74±0Ab	——	——	36.79±1.03Aa
	0—20	44.71±1.34Bb	26.97±0.88Ba	18.60±0Ab	——	——	42.50±0.77Aa
	20—40	31.66±1.14Ab	26.00±0.24Bb	12.23±0.47Bb	——	——	21.13±0.54Ba
石灰岩	根际土	104.49±1.27Ac	33.55±0.06Aa	32.21±0.11Aa	22.29±0.44Ab	23.42±0.97Aa	65.10±0.97Ab
	0—20	93.03±1.74Ac	32.30±1.35Aa	27.06±0.31Aa	19.99±0.05Ab	36.37±0.64Bb	63.07±0.69Ab
	20—40	58.51±1.56Bc	20.26±0.01Ba	13.08±0.33Bc	11.24±0.06Bb	14.90±0.03Ca	31.35±0.51Bb

注:同列不同大写字母表示相同岩性不同土层间差异极显著($P<0.01$);同列不同小写字母表示相同土层不同岩性间差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同岩性优势树种、枯落物和表层土壤有机质的δ¹³C值

2.2.1 不同岩性优势树种各器官的δ¹³C值 利用单因素方差分析岩性间林分δ¹³C值的差异性表明(样本选取叶、枝杆样品值, $n=6$),石灰岩柏木δ¹³C值与其他岩性呈极显著性差异($P<0.001$),桉木在石灰岩与白云岩呈显著性差异($P=0.024$),其他 4 个树种在岩性间无显著性差异,说明喀斯特区部分树

种δ¹³C值的形成受岩性影响。同种岩性不同树种间δ¹³C值也存在显著性差异,白云岩猴樟、柏木、马桑 3 个树种相互间或与其他树种呈极显著差异($P\leq 0.001$);白云质砂岩猴樟与其他 3 树种呈极显著差异($P<0.001$);石灰岩上猴樟、马桑与其他树种呈极显著差异($P<0.001$),表明部分树种间δ¹³C值存在差异。3 种岩性上不同树种均表现出根>枝杆>叶片的分布格局(表 5)。

表 5 3 种岩性上不同树种各器官δ¹³C值

单位:‰

岩性	器官	柏木	猴樟	马桑	光皮桦	桉木	圆果化香
白云岩	根	-25.35±0.04Aa	-27.51±0Ab	-26.20±0.04Ac	-27.68±0Abd	-27.61±0.06Ad*	——
	枝杆	-25.64±0.01Ba	-28.71±0.01Bb	-26.94±0.01Bc	-27.98±0.01Abd	-28.03±0.03Bb*	——
	鲜叶	-27.26±0Ca	-29.97±0.06Cb	-27.91±0.06Cc	-29.94±0.11Bb	-28.95±0Cd*	——
白云质砂岩	根	-25.43±0.02Aa	-28.74±0.02Ab	-25.78±0.01Aa	——	——	-28.11±0.07Ac
	枝杆	-25.61±0.01Aa	-30.73±0Bb	-26.76±0.04Bc	——	——	-28.22±0Ad
	鲜叶	-27.19±0.04Ba	-31.49±0.94Cb	-27.91±0Ca	——	——	-28.97±0.01Bc
石灰岩	根	-27.16±0.02Aa**	-28.28±0.01Ab	-25.71±0Ac	-27.40±0.03Aa	-28.16±0.01Ab*	-27.12±0Aa
	枝杆	-27.12±0.04Aa**	-29.34±0.01Bb	-26.67±0Bc	-27.71±0.05Ad	-28.87±0.03Be*	-27.38±0.04Bad
	鲜叶	-29.32±0.41Ba**	-31.85±0.73Cb	-26.99±0.25Cc	-29.25±0.46Ba	-29.78±0.08Ba*	-29.84±0.22Ca

注:同列不同大写字母表示同一岩性间差异显著($P<0.05$);同行不同小写字母表示同一器官在不同树种间差异极显著($P<0.01$);**表示本树种在该岩性上与其他岩性间存在极显著差异;*表示本树种在该岩性上与其他岩性间存在显著性差异。

2.2.2 不同岩性各树种林分枯落物的δ¹³C值 由表 6 可知,各树种林分中枯落物δ¹³C值表现出半分解层大于新鲜落叶。白云岩树种枯落物δ¹³C值总体增幅较大,白云质砂岩次之,而石灰岩较小。从 3 种岩性上的林分看,白云岩、白云质砂岩、石灰岩各林分增幅分别为马桑林 8.00%,8.17%,6.11%,柏木林 5.00%,3.00%,1.23%,猴樟林 2.00%,3.00%,2.14%。马桑林和

光皮桦林在各岩性增加较大,平均分别为,7.43%,8.21%。而圆果化香林、柏木林、猴樟林较低,平均值分别为 2.67%,3.08%,2.38%。

2.2.3 不同岩性各树种林分土壤的δ¹³C值 由表 7 可知,除柏木林δ¹³C值在 3 种岩性上发育的土壤呈下层<上层外,其他各种树种林分均表现为下层>上层或根际土,根际土与上层土壤无显著性差异。

2.2.4 不同岩性各林分植物—枯落物—土壤系统的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化 由图 1 可知,不同岩性各种林分的植物—枯落物—土壤系统中, $\delta^{13}\text{C}$ 值从根、枝杆、新鲜叶

片、枯落物、根际土、0—20,20—40 cm 土层的变化趋基本一致,表现为植物叶片(新鲜枯落物)<枯落物分解层<枝杆<根<上层土壤<下层土壤。

表 6 3 种岩性不同树种枯落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值 单位:‰

岩性	器官	柏木	猴樟	马桑	光皮桦	桉木	圆果化香
白云岩	新鲜枯落物	-27.55±0A	-30.03±0.03A	-27.80±0.01A	-28.86±0A	-28.39±0.14A	——
	半分解层	-26.22±0.11B	-29.45±0.67B	-25.52±0.44B	-26.34±0.77B	-26.69±0.82B	——
白云质砂岩	新鲜枯落物	-27.88±0.04A	-31.74±0.05A	-28.14±0.01A	——	——	-29.62±0A
	半分解层	-27.17±0A	-30.63±0.22B	-25.84±0.07B	——	——	-28.87±0.55A
石灰岩	新鲜枯落物	-29.32±0A	-30.44±0.61A	-27.02±0.03A	-29.45±0.02A	-29.26±0.34A	-28.20±0.17A
	半分解层	-28.96±0.47A	-29.79±0.66A	-25.37±0.53B	-27.56±0.96B	-28.27±0.46B	-27.41±0.45A

表 7 3 种岩性不同树种群落土壤剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 值 单位:‰

岩性	土层深度/cm	柏木	猴樟	马桑	光皮桦	桉木	圆果化香
白云岩	根际土	-20.42±0.02A	-23.73±0A	-24.45±0.01A	-22.09±0.33A	-20.70±0A	——
	0—20	-19.85±0A	-22.53±0B	-24.30±0.04A	-20.29±0.46B	-20.37±0.63A	——
	20—40	-20.67±0.03A	-21.76±0.06B	-21.57±0.04B	-19.78±0.16B	-18.46±0.11B	——
白云质砂岩	根际土	-16.07±0.07A	-18.95±0A	-20.95±0.22A	——	——	-21.86±0.27A
	0—20	-18.57±0.66B	-17.38±0.11B	-20.14±0.32A	——	——	-21.69±0.36A
	20—40	-19.66±0.02C	-17.13±0.01C	-19.77±0.41B	——	——	-21.17±0.57B
石灰岩	根际土	-21.09±0.24A	-21.29±0.28A	-22.64±0.31A	-21.38±0.42A	-24.92±0.32A	-19.86±0.08A
	0—20	-20.72±0A	-21.27±0.36A	-22.70±0.03A	-21.31±0.27A	-25.93±0.47B	-19.38±0.05A
	20—40	-21.53±0.10A	-20.45±0B	-21.83±0.01B	-20.52±0B	-24.20±0.11A	-19.27±0.18A

注:同列不同大字母表示同一岩性上不同土层间差异显著($P<0.05$)。

由表 6、表 7 可知,植物—枯落物—土壤系统中,土壤层、植物体(枯落物)、半分解层之间呈显著性差异($P<0.05$),与枯枝落叶层相比,各种岩性土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值均有上升但幅度有所不同,白云质砂岩中猴樟、柏木群落升幅较大,分别为 11.68‰,11.1‰,而白云岩上马桑、石灰岩上桉木群落升幅较小,分别为 1.07‰,2.73‰。

2.3 不同优势树种群落土壤有机质的更新率

本文利用各林分上下层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化表达有机质更新状况,研究发现,通过引用公式计算柏木林更新率为负值,因此,图中未表示出来(图 2)。

以 3 种岩性均有的猴樟和马桑林分土壤有机质的更新率为平均值,3 种岩性土壤有机质更新率分别为白云岩 26.57%、石灰岩 12.52%、白云质砂岩 3.05%。不同树种林分的土壤有机质更新率为桉木林 26.71%、马桑林 21.66%、光皮桦林 7.22%、猴樟林 6.43%、圆果化香林 3.65%,总体上表明,桉木林、马桑林土壤更新率较大,猴樟、圆果化香等林分土壤更新率较低。

2.4 不同岩性上各林分土壤有机碳的周转速率

用 log SOC 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的回归模型能够较好解释土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变异特征^[9],白云岩和石灰岩植物群落 SOC 含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间有较好的相关性,白云质砂岩上没有相关性。白云岩上回归方程斜率 K 值为 3.15,石灰岩上为 0.85(表 8)。表明白云岩上群落有

机碳的周转率最大,石灰岩较小。

3 讨论

3.1 不同岩性树种植株 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征及变化

本研究表明,研究区所选择树种林分 $\delta^{13}\text{C}$ 值既表现出自身特性,部分树种也受到岩性影响,柏木、马桑叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较大,猴樟最小,白云质砂岩柏木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大(-27.19‰),石灰岩猴樟最小(-31.50‰),结果与贵州喀斯特区和石漠化区树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围(-26.98‰~-29.15‰)^[21] 和(-25.55‰~-30.28‰)^[17] 相似。表明本研究测定的 $\delta^{13}\text{C}$ 值位于喀斯特区树种 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围内。以 3 种岩性上均有的柏木、马桑、猴樟树种 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行比较,石灰岩上柏木与其他 2 种岩性呈极显著差异($P<0.001$),马桑、猴樟在岩性间无显著差异。岩石形成的环境、形成机制、组成成分和比例存在差异,体现在后期风化成土过程中风化过程和形成植物生存环境及土壤性质上也有差别。如石灰岩的岩溶作用比白云岩强烈,形成的小生境和土壤性质有所不同,这些小生境和土壤性质必然对部分树种的生理活动产生影响。但从研究结果看出,岩性并不是对所有树种 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响,马桑、猴樟等树种在岩性上没有表现出显著差异。相同岩性发育的土壤上,树种不同, $\delta^{13}\text{C}$ 值也有差异,猴樟、柏木、马桑在 3 种岩性上均存

在极显著性差异($P<0.001$),这主要是树种本身的生物学特性引起的。各种岩性上所有树种植物体中 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布格局基本一致,根比枝、叶有显著增加,并呈极显著差异($P<0.001$),这主要是不同器官所含木质素、脂类、纤维素等组分不一致引起的,脂类和木质素的 ^{13}C 比其他组分更加贫化^[22]。另外,各器官在呼吸代谢过程中,释放 ^{13}C 的量也存在差异,也有可能致各器官之间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异,从而形成了叶片<枝杆<根的分布格局。

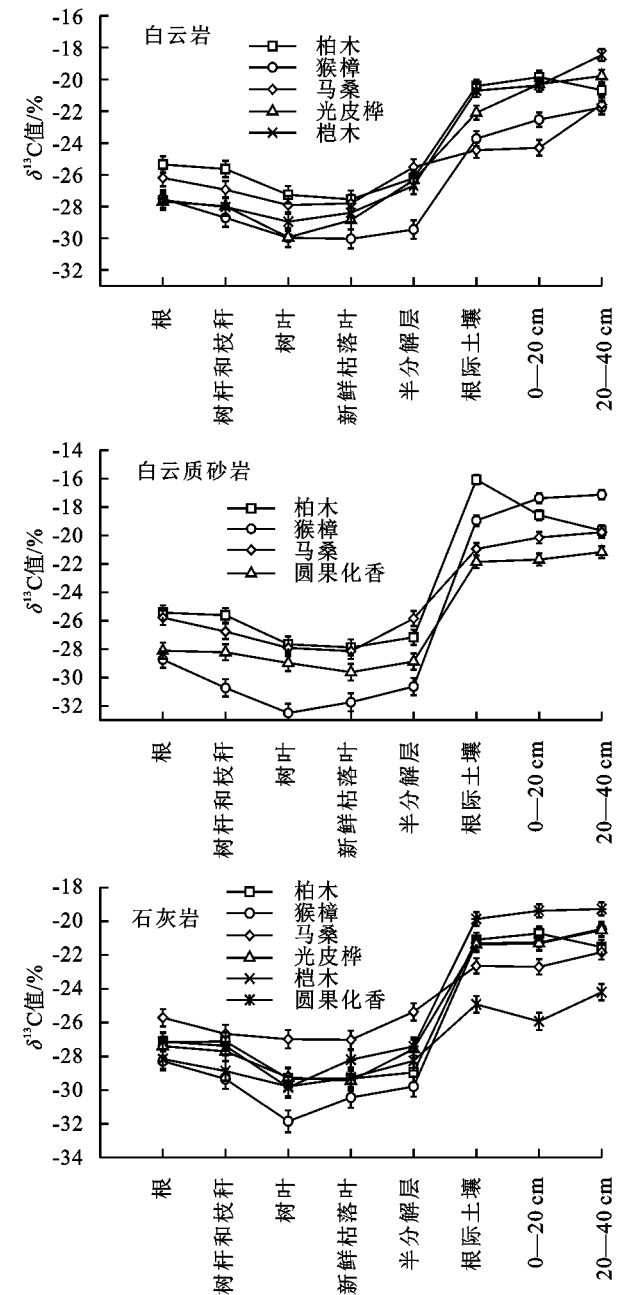
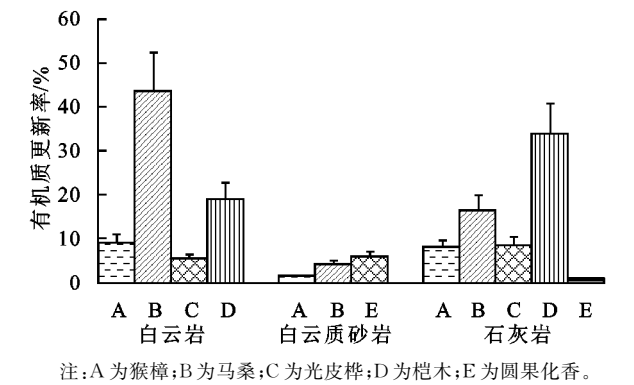


图 1 3 种岩性各种种植物群落植物—枯落物—土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化

3.2 喀斯特区森林植物—枯落物—土壤系统有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征

不同岩性上,各种林分群落植物—枯落物—土壤系统有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化规律总体表现出植物叶片(新鲜枯落物)<枯落物分解层<枝杆<根<上层土

壤<下层土壤, $\delta^{13}\text{C}$ 值在系统内从光合作用吸收 C 到枯落物在土壤中逐渐分解释放 C 是逐渐增加的,与很多结论一致^[9,23-24]。随着土层加深,枯落物分解, $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐增大,主要原因:一是微生物分解的分馏效应,微生物在分解有机质过程中具有选择性,优先分解轻同位素成分(如木质素和脂类),从而土壤中重同位素成分增加^[25];二是枯落物含有不同的组分,各组分的降解难易程度不同,易降解物质(如单糖类)逐渐减少,难降解类物质(如纤维素)逐渐增加,而难降解类物质比易降解类物质富含 $\delta^{13}\text{C}$ ^[22];三是外部大气环境影响,地球大气 $^{13}\text{CO}_2$ 在近 100 多年来不断贫化^[26],通过光合作用吸收大气的植物也存在 $\delta^{13}\text{C}$ 贫化。这些原因综合导致植物—枯落物—土壤系统产生有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐增加的生态学过程。



注:A 为猴樟;B 为马桑;C 为光皮桦;D 为桉木;E 为圆果化香。

图 2 3 种岩性各种种植物群落有机质更新率

表 8 3 种岩性各林分土壤有机碳对数值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间回归模型参数

岩性类型	回归方程	R^2	P
白云岩	$y = -3.1455x - 6.443$	0.4944	<0.01
白云质岩	$y = -0.2147x - 19.949$	0.1336	>0.05
石灰岩	$y = -0.8517x - 15.195$	0.1456	<0.05

枯落物—土壤界面是生物地球化学循环中重要的生态学界面,与枯落物比较,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值有大幅度增加,这与李龙波等^[2]、Buchman 等^[27]研究结果一致。但本研究中,白云质砂岩上林分的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出较大增幅,一般认为,输入土壤有机物的来源植物类型是影响 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要因素,碳同位素分馏过程通常使土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变幅在 $1.0\text{‰} \sim 3.0\text{‰}$,变幅高于 3.0‰ ,则通常可能意味着输入土壤中的有机物质是 C_3 和 C_4 植物的混合^[27-28]。本研究部分林分增加幅度较大,说明林分土壤有机质组成不仅是优势树种,还有 $\delta^{13}\text{C}$ 值较大的种类,此推论在样地调查中得到很好证实,尤其是白云质砂岩上林分,由于土层浅薄,含砂量大,水分渗漏,水肥严重贫瘠,不利于乔木树种生存,但白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)和芒(*Miscanthus sinensis*)等 C_4 植物先锋物种却生

长茂盛, C_4 草本植物对林分土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ “富集”贡献大, 故土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值增幅较大, 这也说明喀斯特区林分 $\delta^{13}\text{C}$ 来源的多样性。

3.3 不同岩性各种林分土壤有机质更新

植物群落在发展过程中, 通过枯落物向土壤输入有机质。土壤老有机质被分解, 而植物新输入枯落物通过腐殖化形成新的有机质, 进而促进土壤有机质的更新^[29]。不同树种林分有机质更新率差异较大, 白云岩上马桑林、石灰岩上桉木林较高, 分别为 43.84%, 34.17%, 石灰岩上的圆果化香林最低, 为 1.15%。这比利用 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素测定盆栽玉米试验更新率范围 (22%~25%)^[30] 要大。马桑林、桉木林有机质更新率大, 主要双重因素引起的: 一是这 2 个树种叶片 C/N 值较其他树种低 (27.08, 22.26), C/N 值低, 更容易分解^[31], 二是结合表 3 看, 马桑林、桉木林土壤为黄壤, 土壤“酸”而黏重, 枯落物分解后, 有机质难以到达下层, 形成上层丰富, 下层贫瘠的分布格局 (表 4)。圆果化香群落有机质更新率低, 土壤有机碳含量却丰富, 主要是群落土壤多为石灰土, 质地疏松, 且圆果化香群落多分布在陡峭的山峰、山顶, 坡度较大, 有机碳“淋溶”和“下渗”较多, 同时群落内草本植物较多, $\delta^{13}\text{C}$ 混合较多, 导致上下层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化无明显规律, 计算出更新率偏低。柏木林下层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值比上层土壤低, 更新率为负值, 这主要可能是柏木是乔木, 根系发达, 能伸入土壤下层, 而柏木枝叶枯落物少, 根系对土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响占主导地位, 造成下层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于上层。

土壤中其他碳迁移过程如生物扰动、溶解性有机碳的淋溶也会影响到土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的垂直分布格局中。但矿化作用被认为是其主导机制^[32], 本研究区气候一致, 树种枯落物的数量和分解难易程度成为影响有机质矿化过程的主要因子, 如在本研究中马桑、桉木叶子量大、分解快, 有机质更新相对其他树种较快; 贵州喀斯特山地, 有机碳受淋溶的物理作用不容忽视, 一些树种林分分布在坡度较陡的山顶或山峰上, 泥土少, 雨水淋溶程度大, 群落积累的有机质“下渗”较多, 土壤上下交换发生多, 导致 $\delta^{13}\text{C}$ 垂直分布格局差异大, 如柏木、圆果化香群落。喀斯特区, 林分虽然表现为纯林, 但土壤干旱、瘠薄, 特别是白云质砂岩区, 林分中生长着更适应这种生境的 C_4 草本和灌木, 数量多且长势好, 对有机质贡献大, 所以研究优势树种土壤有机质更多表现为优势树种构建的林分所形成, C 元素来源的多样性决定了林分土壤有机质更新特征的复杂性。总体上看, 马桑林、桉木林对土壤有机

质更新较快, 适应养分贫瘠的喀斯特生境。另外, 不同岩性发育的土壤性质不同, 也会导致有机质更新率的差异。白云岩 (26.57%)、石灰岩 (12.52%)、白云质砂岩 (3.05%), 表明白云岩上的林分对有机质更新比石灰岩和白云质砂岩上的林分更有利。土壤有机碳周转率研究表明白云岩上林分回归方程斜率 K 值较大 (3.15), 石灰岩上植物群落较小 (0.82)。

4 结 论

受岩性影响, 部分树种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同岩性上存在显著性差异, 石灰岩上柏木 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其他岩性之间呈极显著差异 ($P < 0.001$), 桉木在石灰岩与白云岩上呈显著性差异 ($P = 0.024$)。不同树种间也存在差异, 猴樟、柏木、马桑 3 个树种相互间或与其他树种多表现出显著性或极显著差异 ($P \leq 0.001$)。由于植物体各器官组分及其比例不一致, 以及各器官呼吸代谢差异, $\delta^{13}\text{C}$ 在植物体内形成了叶 < 枝杆 < 根的分配格局。3 种岩性上, 各树种群落植物—枯落物—土壤系统的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化基本一致, 即: 植物叶片 (新鲜枯落物) < 枯落物分解层 < 枝杆 < 根 < 上层土壤 < 下层土壤。在枯落物—土壤界面, 由于 $\delta^{13}\text{C}$ 值分馏过程中微生物、树种本身特性的影响, 不同林分 $\delta^{13}\text{C}$ 值增幅不同, 增幅较大的是白云质砂岩上的猴樟林和柏木林, 分别为 11.68%, 11.10%, 增幅较小的是白云岩上的马桑林、石灰岩上的桉木林, 分别为 1.07%, 2.73%。各林分土壤有机质更新率为白云岩上马桑林和石灰岩上桉木林较高 (43.84%, 34.17%), 石灰岩上的圆果化香林最低 (1.15%)。喀斯特地区土层薄, 养分供给总量不足, 提高有机质分解速度、养分循环速度, 有利于林分对养分的需求, 但分解太快容易被淋溶等因素作用造成养分流失, 因此喀斯特区森林更需要一定量的枯落物和腐殖质形成巨大“养分库”, 产生养分“收蓄”和“缓释”机制, 为喀斯特区森林生长提供持续有效的养分。

参考文献:

[1] 项文化, 黄志宏, 闫文德, 等. 森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2365-2372.
[2] 李龙波, 刘涛泽, 李晓东, 等. 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[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 241-247.
[3] Bowling D R, Pataki D E, Randerson J T. Carbon isotopes in terrestrial ecosystem pools and CO_2 fluxes [J]. New Phytologist, 2008, 178(1): 24-40.
[4] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 6.
[5] Rothe J, Gleixner G. Do stable isotopes reflect the food

- web development in regenerating ecosystems? [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2000, 36 (3):285-301.
- [6] Bernoux M, Cerri C C, Neill C, et al. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates [J]. *Geoderma*, 1998, 82 (3):43-58.
- [7] 刘涛泽, 刘丛强, 张伟, 等. 喀斯特地区坡地土壤有机碳的分布特征和 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成差异[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5):115-118, 124.
- [8] 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):1435-1444.
- [9] 司高月, 李晓玉, 程淑兰, 等. 长白山垂直带森林叶片—凋落物—土壤连续体有机质动态—基于稳定性碳同位素分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(16):5285-5293.
- [10] 张政, 蔡小真, 唐偲頔, 等. 可溶性有机质输入对杉木人工林表层土壤有机碳矿化的激发效应[J]. *生态学报*, 2017, 37(22):7660-7667.
- [11] 李新乐, 鲍芳, 吴波, 等. 荒漠植物白刺新固定碳在植物—土壤系统中的分配[J]. *草业学报*, 2019, 28(2):33-40.
- [12] 王利超, 胡文瑄, 王小林. 白云岩化过程中铍含量变化及铍同位素分馏特征与意义[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(4):464-471.
- [13] 周德全, 王世杰, 刘秀明. 石灰土(碳酸盐岩风化壳)形成地球化学过程研究[J]. *地球与环境*, 2005, 33(2):31-38.
- [14] 高福红, 张永胜, 蒲秀刚, 等. 白云岩化作用类型及机理:以歧口凹陷古近系沙河街组一段为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(2):355-369.
- [15] 喀斯特科学数据中心[EB/OL]. (2007-08-06)[2018-03-18] <http://www.karstadata.cn/downloadData.aspx? Id=663>.
- [16] 符裕红, 黄宗胜, 喻理飞. 岩溶区不同根系地下生境类型白栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化[J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (11):2961-2967.
- [17] 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 贵州花江峡谷区常见乔灌植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对喀斯特石漠化程度的响应[J]. *林业科学*, 2007, 43(6):38-43.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1999:36, 109.
- [19] Gregorich E G, Ellert B H, Monreal C M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural $\delta^{13}\text{C}$ abundance [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(2):161-167.
- [20] 林而达, 李玉娥, 郭李萍, 等. 中国农业土壤固氮潜力与气候变化[M]. 北京: 科学出版社, 2005:57.
- [21] 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 等. 贵州喀斯特山区植物叶片碳同位素组成研究[J]. *地球与环境*, 2007, 35(1):33-38.
- [22] Benner R, Fogel M L, Sprague E K, et al. Depletion of ^{13}C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies [J]. *Nature*, 1987, 329(6141):708-710.
- [23] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土剖面有机碳的分布和 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(6):957-964.
- [24] Georg G, Kaiser K. Dissolved organic matter in soil: Challenging the paradigm of sorptive preservation [J]. *Geoderma*, 2003, 113:293-310.
- [25] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, 30:1995-2007.
- [26] Vaughn B H, Evans C U, White J W C, et al. Global network measurements of atmospheric trace gas isotopes [J]. *Springer*, 2010(1):3-31.
- [27] Buchmann N, Kao W Y, Ehleringer J. Influence of stand structure on carbon-13 of vegetation, soils, and canopy air within deciduous and evergreen forests in Utah, United States [J]. *Oecologia*, 1997, 110:109-119.
- [28] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K Y. Carbon isotope discrimination and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, 40:503-537.
- [29] 寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 等. 大气 CO_2 浓度升高和氮肥水平对麦田土壤有机碳更新的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(3):459-465.
- [30] 杨兰芳. 植物生长对土壤碳循环和 N_2O 排放的影响[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2004.
- [31] Chapin F S III, Matson P A, Vitousek P. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer, 2011:1-546.
- [32] Amundson R, Baisden W T. Stable isotope tracers and mathematical models in soil organic matter studies [M]. New York: Springer, 2000:117-137.