DOI:10.16853/j.cnki.1009-3575.2026.05.004

贵州高海拔地区不同林型土壤碳库特征与稳定性影响因素研究

陈 进[1,4],任廷森[2],丁访军[1,3,*],袁丛军[1,4]
(1.贵州省林业科学研究院,贵阳 550005;2.贵州大学林学院,贵阳 550025;3.贵州荔波喀斯特森林生态系统国家定位观测研究站,黔南州 558400;4.贵州雷公山森林生态系统定位观测研究站,黔东南州 556000)

摘要:本文揭示贵州高海拔地区不同森林生态系统土壤碳库的异质性特征,并深入解析其稳定性的影响因素,为该区域的生态功能评估和碳汇管理提供科学依据。研究以贵州威宁高海拔地区阔叶混交林(KYH)、针阔混交林(ZKH)和针叶纯林(ZYC)土壤为研究对象,测定不同森林类型土壤碳及其组成含量,计算土壤碳库质量指数,解析贵州高海拔地区不同森林类型土壤碳库特性与稳定性影响因素。结果表明:1)土层而非森林类型是贵州高海拔地区主要森林生态系统土壤有机碳及其组分含量分异的因素,对于不同的林型,土层可单独解释约80%以上的土壤活性有机碳含量差异;2)不同森林类型土壤碳库质量指数差异不显著,土壤碳库管理指数随林型进展演替而逐渐增加,阔叶混交林的土壤碳库较为稳定;3)易氧化有机碳的积累可能是贵州高海拔地区不同林型土壤碳库稳定性的重要影响因素。综上,土层分异决定土壤有机碳及其组分的空间格局,森林类型的进展演替通过调节易氧化有机碳过程间接影响碳库质量,从而决定了森林土壤碳循环的方向与效率。

关键词:土壤碳库质量;土壤碳库管理指数;土壤易氧化有机碳;碳库稳定性
中图分类号:S714.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-3575(2026)05-0026-10

A Study on Soil Carbon Pool Characteristics and Stability Influencing Mechanisms of Different Forest Types in High-altitude Areas of Guizhou

CHEN Jin[1,4], REN Tingsen[2], DING Fangjun[1,3,*], YUAN Congjun[1,4]
(1. *Guizhou Academy of Forestry*, *Guiyang* 550005, *China*;
2. *College of Forestry Guizhou University*, *Guiyang* 550025, *China*;
3. *Guizhou Libo Karst Forest Ecosystem Observation and Research Station*, *Qiannan* 558400, *China*;
4. *Guizhou Leigongshan Forest Ecosystem Observation and Research Station*, *Qiandongnan* 556000, *China*)

Abstract: This study aimed to reveal the heterogeneity of soil carbon pools among different forest ecosystems in the high-altitude regions of Guizhou, and to elucidate the factors influencing their stability, thereby providing a scientific basis for ecological function assessment and carbon sink management in this area. Soils from three typical forest types—broad-leaf mixed forest (KYH), conifer-broad-leaf mixed forest (ZKH), and coniferous pure forest (ZYC)—in the high-altitude region of Weining, Guizhou, were selected as research objects. The contents of soil organic carbon and its components were measured, and the soil carbon pool quality indices were calculated to characterize the carbon pool properties and identify their stability-controlling factors. The results showed that the soil depth, rather than forest type, was the dominant factor driving the variation in soil organic carbon and its components across major forest ecosystems in the high-altitude region of Guizhou. For different forest types, the soil depth alone explained more than 80% of the variation in soil labile organic carbon content. The soil carbon pool quality indices did not differ significantly among forest types, but the soil carbon management index (CMI) increased progressively along the successional gradient, indicating higher carbon pool stability in broadleaf mixed forests. The accumulation of easily oxidizable organic carbon (EOC) may be a key factor influencing the stability of soil carbon pools in high-altitude forests of Guizhou. In summary, soil stratification determines the spatial distribution of soil organic carbon and its components, while forest succession indirectly affects carbon pool quality by regulating the processes of labile organic carbon dynamics, thereby controlling the direction and efficiency of forest soil carbon cycling.

Key words: Soil carbon pool quality; Soil carbon pool management index; Soil easily oxidizable organic carbon; Stabilization mechanisms

作为集水库、粮库、钱库、碳库于一身的大宝库,森林不仅提供多重生态服务功能,还在缓解气候变化、促进社会经济可持续发展等方面发挥着战略性与基础性的作用[1]。森林是地球上最大的碳汇,碳储存密度比其他植被更高[2-3]。鉴于不同森林类型的生态服务功能存在差异,如何针对其碳汇功

收稿日期:2025-10-10
基金项目:贵州省科技厅计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般241);2024年森林资源管理补助资金项目(贵州省林业碳汇监测技术研究);2025年森林资源管理补助资金项目(贵州森林固碳能力及碳汇监测体系建设与研究)
作者简介:陈 进(1994—),男,博士,副研究员,主要从事森林生态学等方面的研究,E-mail:1576136472@163.com;*为通信作者,丁访军(1969—),男,博士,研究员,主要从事森林生态学等方面的研究,E-mail:ding3920034@163.com

能开展协同与权衡，对于森林碳库的可持续发展和管理至关重要[1-2,4]。为明确森林主要生态功能、促进分类经营管理、提升林业效能和科学管理，对不同森林类型土壤碳库进行研究具有重要的意义[5-7]。

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库[8-10]。其构成不仅影响自身的累积与分解过程，还直接作用于全球陆地生态系统的碳平衡，同时影响着土壤质量的变化[11-12]。土壤碳库是指储存在土壤中的碳，由有机碳和无机碳组成[13-15]。土壤有机碳的形成抵消了二氧化碳的排放，也促进了土壤结构的形成并提高其稳定性[16-17]，土壤碳库是碳汇最重要的功能结构[18]，土壤结构中不同有机碳库形成过程及影响因素成为全球气候变化研究中的热点之一[19]。影响土壤碳库的因素可分为气候条件、地形条件、土壤条件以及植被条件。当林分类型改变时，会同步影响土壤温度、水分含量、养分循环以及微生物活动等指标[20]。因此，研究不同林分类型土壤碳库组成变化及稳定性，对提高其土壤质量有重要价值。

高海拔森林对气候变化更敏感，其土壤碳循环呈现显著特征。研究显示，高海拔区有机碳含量普遍较同纬度低海拔区高，微生物驱动的分解速率呈现随海拔升高指数下降趋势[21-22]，贵州威宁高海拔地区平均海拔 2 200 m，土壤碳库相关研究主要集中在草海湿地重金属分布[23]、土地利用对土壤理化性质影响[24]，土壤酶活性及微生物生物量碳[25]，草海湿地周丛生物碳计量[26]等方面，而对森林土壤碳库及其组分的研究还存在一定不足。自 1985 年启动人工造林以来，威宁高海拔地区森林类型主要以云南松针叶纯林、云南松-麻栎针阔混交林以及麻栎-桤木阔叶混交林为主。因此，本研究以该区域的典型的针阔混交林、针叶纯林和常绿阔叶混交林 3 种典型林分为研究对象，探究不同林分土壤碳库及其稳定性的变化特征，为贵州高海拔地区森林经营管理提供理论依据。

1　研究区概况

研究区位于贵州省西北部典型高海拔地区的威宁县（2 200m）国有沙子坡林场黑石工厂区，样地设在海拔 1 800~1 900 m 的阔叶混交林（KYH）、针阔混交林（ZKH）和针叶纯林（ZYC）人工林中。研究区内常见优势乔木有云南松（*Pinus yunnanensis*）、麻栎（*Quercus acutissima*）、白栎（*Quercus fabri*）、慈竹（*Bambusa emeiensis*）；优势灌木有河滩冬青（*Ilex metabaptista*）、山胡椒（*Lindera glauca*）、中华绣线菊（*Spiraea chinensis*），优势草本有荩草（*Arthraxon hispidus*）、沿阶草（*Ophiopogon bodinieri*）等，详细样地信息见表 1。

2　材料与方法

2.1　样地设置与土壤采样

依据不同经营措施，本研究从森林类型角度出发，评估不同森林类型土壤的物理与生态特征的变化。以相同林龄的针叶林、针阔混交林、阔叶混交林为研究对象，在 3 种不同森林类型的人工林内分别设置大小为 25. 8 m×25. 8 m 的样地，每种类型样地设置 3 个重复，共 9 个样地（表 1）。采用五点取样法，每个样地选取具有代表性的采样点，首先去除土壤表面凋落物和腐殖质层，对 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 深度土壤进行取样，且均在晴天进行。将同一土层取样点取得的土壤样品混合，并去除可见的植物细根等杂质，保持 4 ℃恒温运回实验室，待自然风干后，测定不同森林类型土壤理化性质等指标。林分类型以树种蓄积量比例确定，针叶纯林划分标准为单个针叶树种蓄积≥90%，阔叶纯林划分标准为单个阔叶树种蓄积≥90%，针阔混交林划分标准为针叶树种或阔叶树种总蓄积占 35%~65%，阔叶混交林划分标准为阔叶树种总蓄积 >65%（表 1）。

2.2　测试方法

土壤全碳采用 TOC 元素分析仪测定；土壤 pH 采用电位法测定；参考焦欢等[27]分离重组有机碳，研磨过筛后采用重铬酸钾外加热法测定有机碳含量[28]，再用差减法计算轻组有机碳含量。根据粒径大小将土壤区分为颗粒有机碳和矿物结合态有机碳，采用超声波分离法分离砂砾和黏粉粒，再用重铬酸钾-硫酸外加热法分别测定有机碳含量[29]。土壤可溶性有机碳（DOC）用 K_2SO_4 溶液提取法测定，土壤有机碳含量（SOC）采用《土壤农化分析》[30]方法测定，土壤微生物量碳（MBC）采用氯仿熏蒸法[31]测定，易氧化有机碳（EOC）采用高锰酸钾氧化法测定。

2.3　数据处理

本文以阔叶混交林土壤作为对照，计算土壤碳库质量指标[32]：

碳库活度（*L*）=土壤活性有机碳含量/土壤非活性有机碳含量；

表1 不同林型样地基本信息

Table 1 Basic situation of different forest type plots

林分类型	坡度/(°)	坡向	坡位	土壤类型	土壤pH	海拔/m	郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm	优势树种	经度	纬度	林龄
针阔混交林(针叶54%,阔叶46%)	10	南195	中	棕黄壤	5.1	1 921	0.6	17.76±7.70	13.47±4.26	云南松、麻栎	104°33′23.71″E	26°37′24.30″N	成熟林
针阔混交林(针叶60%、阔叶40%)	20	西南205	中	黄壤	4.9	1 932	0.6	12.04±5.74	9.49±3.75	云南松、麻栎	104°33′23.27E	26°37′26.21″N	成熟林
针阔混交林(针叶46%,阔叶54%)	10	南165	中	棕黄壤	4.8	1 951	0.7	11.02±5.39	9.57±3.38	麻栎、云南松	104°33′25.27″E	26°37′27.34″N	成熟林
针叶林(针叶90%)	15	西27	中	黄壤	4.9	1 890	0.8	16.96±8.34	13.02±4.61	云南松	104°33′38.13″E	26°36′39.72″N	成熟林
针叶林(针叶92%)	20	西南210	中	黄壤	5.1	1 880	0.7	19.36±7.42	13.87±3.78	云南松	104°33′36.97″E	26°36′38.18″N	成熟林
针叶林(针叶91%)	20	南220	中	黄壤	5.2	1 877	0.7	14.47±5.46	11.65±3.72	云南松	104°33′36.22″E	26°36′40.93″N	成熟林
阔叶混交林(阔叶79%)	30	西北308	中	棕黄壤	4.9	1 894	0.7	25.35±11.84	14.25±4.93	麻栎、槭木	104°33′40.76″E	26°36′34.67″N	成熟林
阔叶混交林(阔叶98%)	20	西266	中	棕壤	5.1	1 898	0.7	35.27±11.65	14.68±2.89	槭木、麻栎	104°33′42.65″E	26°36′16.46″N	成熟林
阔叶混交林(阔叶96%)	20	西256	中	棕黄壤	5.1	1 885	0.7	31.7±10.24	16.04±4.81	麻栎、槭木	104°33′40.46″E	26°36′36.63″N	成熟林

碳库活度指数(I_L)=样品的碳库活度/参考土壤的碳库活度;

碳库指数(I_{CP})=样品总碳含量/参考土壤总碳含量;

碳库管理指数(I_{CM})=I_{CP}×I_L×100%。

使用WPS2025对数据进行保存和查看,利用R语言(v4.5.1)tidyverse包进行数据的整理和分析[33],使用stats包对土壤理化因素和碳库质量指数进行非参数组间差异的Kruskal-Wallis检验,p值矫正方法为Benjamini-Hochberg,采用ggplot2包绘图[34]。利用rstatix包anova_test函数进行方差分析,利用lavaan包sem函数构建结构方程模型,利用fitMeasures函数计算结构方程模型参数[35],利用semPlot包semPaths函数绘制结构方程模型示意图[36]。

3 结果与分析

3.1 林型和土层对土壤有机碳组分及土壤碳库质量的影响

以森林类型为随机效应因子,以土层为固定效应因子,分别对比土壤有机碳、易氧化有机碳、惰性有机碳、微生物生物量碳和可溶性有机碳的差异。结果表明,森林类型和土层的交互作用对土壤有机碳、易氧化有机碳、惰性有机碳、微生物生物量碳有显著影响。其中,森林类型、土层对易氧化有机碳的单独效应均存在显著性差异,而土层对土壤有机碳、惰性有机碳、微生物生物量碳的单独效应存在显著性差异(表2),这暗示了土壤有机碳及组分的变异主要来源于土层差异而非森林类型的不同,森林类型对可溶性有机碳的影响存在显著性差异,同时,这种差异还受到土层的影响。此外,森林类型和土层的交互作用对CMI、CPI、LI和L指数的影响不显著,二者的单独效应影响亦不显著(表2)。

进一步地,本文探究了土层对不同林型土壤有机碳组分含量的影响,结果表明,对于针叶纯林、针阔混交林和阔叶混交林,土层分别单独可以解释约80%、87%和61%的有机碳含量差异且影响显著(表3),对于阔叶混交林、针阔混交林以及针叶纯林,土层分别可以单独解释约97%、92%和97%的微生物生物量碳含量差异,单独解释约93%、92%和86%的易氧化有机碳含量差异且影响显著(表3)。综上,土层是土壤有机碳及其组分含量差异主要来源。此外,土层对土壤碳库质量指数变异的单独解释率均较低。

当考虑森林类型对土壤有机碳及其组分的影

表2　土层和森林类型之间有机碳、易氧化有机碳、惰性有机碳、可溶性有机碳以及碳库质量指数的主效应及交互效应检验结果统计表

Table 2　Statistical results of main and interaction effects between soil layer and forest type on OC, EOC, ROC, DOC and CPQI.

指标	效应项	Chisq	Df	Pr(>Chisq)	显著性
SOC	截距	52.96	1	3.40×10^{-13}	***
	森林类型	3.17	2	0.21	NS
	土层	15.47	3	1.46×10^{-3}	**
	森林类型×土层	4.71	6	0.58	NS
ROC	截距	30.64	1	3.10×10^{-8}	***
	森林类型	3.85	2	0.15	NS
	土层	8.87	3	0.03	*
	森林类型×土层	4.75	6	0.58	NS
EOC	截距	198.05	1	2.00×10^{-16}	***
	森林类型	9.19	2	0.01	*
	土层	76.32	3	2.00×10^{-16}	***
	森林类型×土层	6.34	6	0.39	NS
MBC	截距	382.16	1	2.00×10^{-16}	***
	森林类型	1.56	2	0.46	NS
	土层	144.43	3	2.00×10^{-16}	***
	森林类型×土层	2.72	6	0.84	NS
DOC	截距	20.88	1	4.89×10^{-6}	***
	森林类型	8.30	2	0.02	*
	土层	3.85	3	0.28	NS
	森林类型×土层	29.22	6	5.53×10^{-5}	***
CMI	截距	14.01	1	1.82×10^{-4}	***
	森林类型	1.14	2	0.56	NS
	土层	0.23	3	0.97	NS
	森林类型×土层	1.71	6	0.94	NS
CPI	截距	24.19	1	8.73×10^{-7}	***
	森林类型	1.19	2	0.55	NS
	土层	0.00	3	1.00	NS
	森林类型×土层	2.99	6	0.81	NS
LI	截距	9.10	1	2.56×10^{-3}	**
	森林类型	1.30	2	0.52	NS
	土层	0.00	3	1.00	NS
	森林类型×土层	1.83	6	0.93	NS
L	截距	11.42	1	7.24×10^{-4}	***
	森林类型	1.63	2	0.44	NS
	土层	0.31	3	0.96	NS
	森林类型×土层	2.09	6	0.91	NS

注：Chisq为卡方，Df为自由度，SOC为土壤有机碳，ROC为惰性有机碳，MBC为微生物生物量碳，EOC为易氧化有机碳，DOC为可溶性有机碳，CMI为碳库管理指数，CPI为碳库指数，LI为碳库活度指数，L为碳库活度。*表示$P<0.05$，**表示$P<0.01$，***表示$P<0.001$，NS表示$P\geq0.05$。

响时，对于易氧化有机碳，林型分别可以单独解释A层64%、B层65%的含量差异；林型可单独解释92%的可溶性有机碳含量差异；此外，林型对其他指标（有机碳组分、土壤碳库质量指数）的各个土层的单独解释率均较低（表4）。

3.2　不同林型间土壤有机碳组分及碳库质量变化特征

多重配对比较分析表明，对于针阔混交林以及针叶纯林，A层的总有机碳含量、惰性有机碳含量和易氧化有机碳均显著高于D层（图1）。在不同森林类型中，易氧化有机碳在不同森林类型中均表现为A层>B层>D层，而在针叶纯林中，C层的易氧化有机碳含量和B、D层间差异不显著，但在阔叶混交林、针阔混交林中，C层易氧化有机碳和B层之间差异均显著，这表明阔叶混交林和针阔混交林中的易氧化有机碳向下周转的速率高于针叶纯林，尤其在40 cm土深以后（图1）。在不同森林类型中，微生物生物量碳在不同林型中均表现为A层>B层>C层>D层，且A层显著高于B层，B层显著高于D层，阔叶混交林和针叶纯林B层显著高于C层，针阔混交林B层和C层之间差异不显著，这表明阔叶混交林和针叶纯林土壤微生物生物量碳向下周转的速率高于针阔混交林，尤其在20 cm土层以后。碳库质量指数是评估碳库稳定性的常用方法之一，本研究中，森林类型和土层交互作用对碳库质量指数无显著影响，表明森林类型和土层交互作用对碳库稳定性影响不显著。

3.3　不同林型间土壤碳库质量变化特征

针叶树种是本气候区的先锋树种，阔叶混交林是顶极群落类型，林型从针叶纯林到针阔混交林再到阔叶混交林，其实质是主要优势乔木树种的有序替代，即演替阶段的转变。我们定义针叶纯林为演替阶段1，针阔混交林为演替阶段2，阔叶混交林为演替阶段3，以演替阶段为自变量、碳库质量指数为因变量构建回归模型。结果显示，随着正向演替，碳库管理指数显著增加（$P<0.05$，$R^2=0.18$），表现为阔叶混交林（88.73±6.79）>针阔混交林（77.89±9.22）>针叶纯林（59.03±7.41）。表明随着演替过程的进行，碳库稳定性逐渐提升，有机碳更容易被微生物降解和植物利用（图2）。此外，随着进展演替，不同森林类型间的碳库活度、碳库活度指数和碳库指数均无显著性变化。

3.4　土壤碳库质量影响因子分析

土壤易氧化有机碳是土壤碳库中周转速率较快的组分，是土壤碳库变化的关键动力，土壤易氧

表3 ANOVA分析的统计量表(土层为自变量)

Table 3 Summary of ANOVA statistics (soil layer as the independent variable)

指标	林型	Effect	DFn	DFd	*F*	*P*	*P*<0.05	GES(Generalized Eta Squared)
	KYH		3	8	4.17	0.05	*	0.61
SOC	ZKH	土层	3	8	17.40	7.24×10^{-4}	*	0.87
	ZYC		3	8	10.30	4.00×10^{-3}	*	0.80
	KYH		3	8	2.52	0.13	NS	0.49
ROC	ZKH	土层	3	8	9.48	0.01	*	0.78
	ZYC		3	8	7.39	0.01	*	0.74
	KYH		3	8	95.40	1.33×10^{-6}	*	0.97
MBC	ZKH	土层	3	8	30.00	1.06×10^{-4}	*	0.92
	ZYC		3	8	72.90	3.77×10^{-6}	*	0.97
	KYH		3	8	36.50	5.16×10^{-5}	*	0.93
EOC	ZKH	土层	3	8	30.10	1.04×10^{-4}	*	0.92
	ZYC		3	8	16.10	$9.48\times10-^{4}$	*	0.86
	KYH		3	8	0.69	0.58	NS	0.21
DOC	ZKH	土层	3	8	29.10	1.19×10^{-4}	*	0.92
	ZYC		3	8	6.94	0.01	*	0.72
	KYH		3	8	0.09	0.96	NS	0.03
CMI	ZKH	土层	3	8	0.78	0.54	NS	0.23
	ZYC		3	8	0.10	0.96	NS	0.04
	KYH		3	8	0.00	1.00	NS	0.001
CPI	ZKH	土层	3	8	0.07	0.97	NS	0.03
	ZYC		3	8	1.64	0.26	NS	0.38
	KYH		3	8	1.06×10^{-5}	1.00	NS	3.98×10^{-6}
LI	ZKH	土层	3	8	0.39	0.77	NS	0.13
	ZYC		3	8	0.53	0.67	NS	0.17
	KYH		3	8	0.09	0.97	NS	0.03
L	ZKH	土层	3	8	0.50	0.69	NS	0.16
	ZYC		3	8	0.30	0.83	NS	0.10

注:Effect为自变量或交互性名称,DFn为分子自由度(效应因子的自由度),DFd为分母自由度(残差的自由度),GES为广义η^2。SOC为土壤有机碳,ROC为惰性有机碳,MBC为微生物生物量碳,EOC为易氧化有机碳,DOC为可溶性有机碳,CMI为碳库管理指数,CPI为碳库指数,LI为碳库活度指数,L为碳库活度。*表示*P*<0.05,NS表示*P*≥0.05。

化有机碳的积累(EOC)可能是土壤碳库稳定性维持的重要因素。选取土壤碳库中的活跃组分(易氧化有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳)与土壤碳库管理指数、土壤pH、土壤有机碳(SOC)建立路径分析(卡方5.76,卡方自由度3,*P*>0.05,拟合指数0.97,近似均方根误差0.07,见图3)。随着林型从针叶纯林→针阔混交林→阔叶混交林的转变,碳库管理指数(CMI)逐渐增加,碳库稳定性逐渐提升。在此过程中,土壤有机碳(SOC)和微生物生物量碳(MBC)对碳库管理指数具有显著的负效应,易氧化有机碳(EOC)对土壤碳库管理指数具有显著的正效应,可溶性有机碳(DOC)对土壤碳库管理指数具有正效应,但影响不显著。土壤有机碳和土壤pH对可溶性有机碳具有显著正效应。土壤有机碳和易氧化有机碳对微生物生物量碳具有显著的正效应。

4 讨论

本研究中,不同林型土壤有机碳及其组分、碳库质量指数均无显著性差异,这可能是因为碳输入和输出较为均衡导致的。在广东佛山,不同林分类型凋落物储量表现为针阔混交林>针叶纯林[37];在安徽大别山,阔叶混交林和针阔混交林的凋落物分解速率高于针叶纯林[38]。通常来说,阔叶混交林和针阔混交林的凋落物储量以及凋落物分解速率要高于针叶纯林,相应地,土壤碳元素的输入量也有类似变化。然而,贵州高海拔地区阔叶混交林、针阔混交林和针叶纯林土壤养分元素含量无显著性差异,这表明贵州高海拔地区不同森林类型土壤养分元素的输入与分解速率整体平衡,导致土壤养分

表 4　ANOVA 分析的统计量表（林型为自变量）

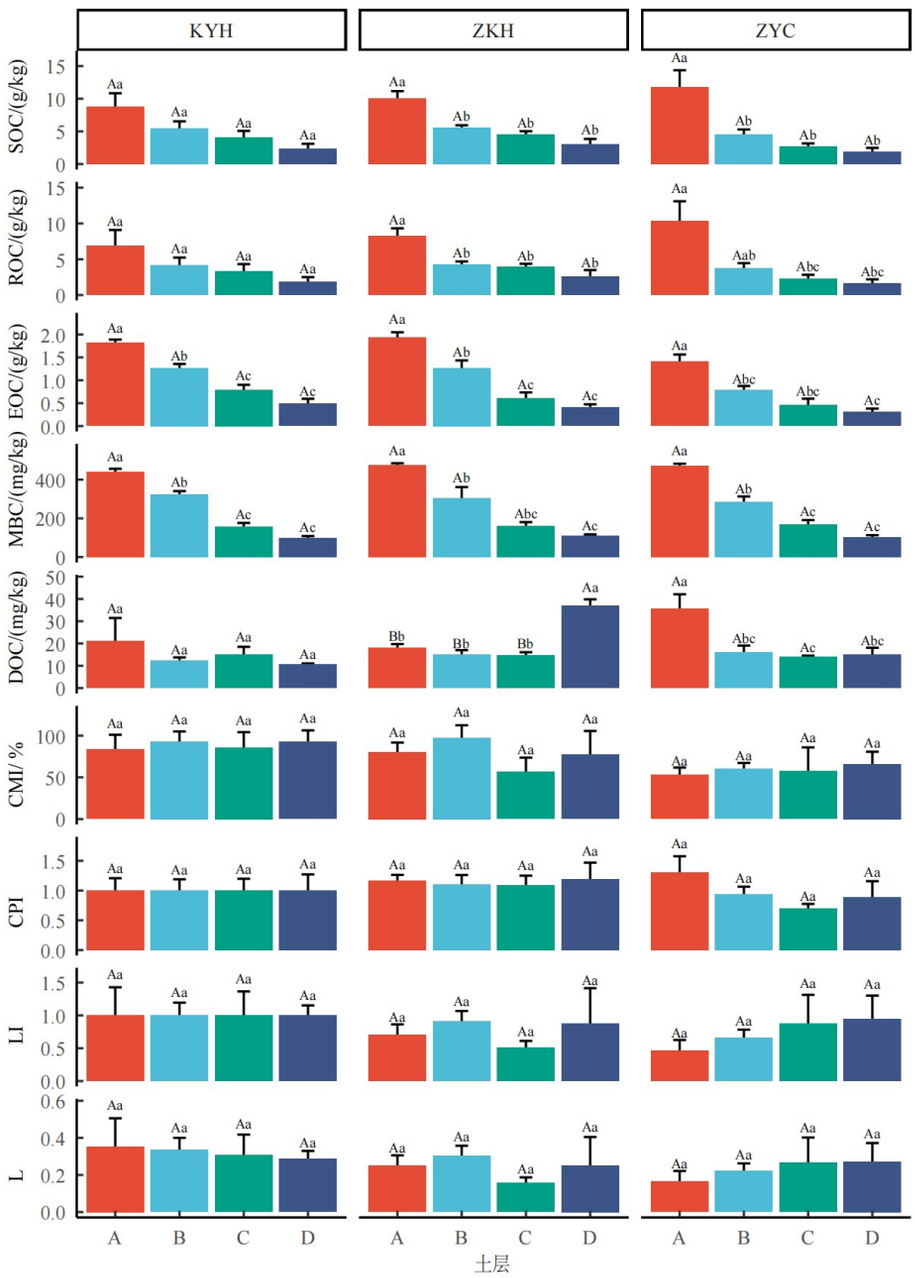
Table 4　Summary of ANOVA statistics (forest type as the independent variable)

指标	土层	Effect	DFn	DFd	*F*	*P*	*P*<0.05	GES(Generalized Eta Squared)
SOC	A	林型	2	6	0.56	0.60	NS	0.16
	B		2	6	0.50	0.63	NS	0.14
	C		2	6	1.95	0.22	NS	0.39
	D		2	6	0.62	0.57	NS	0.17
ROC	A	林型	2	6	0.67	0.55	NS	0.18
	B		2	6	0.13	0.88	NS	0.04
	C		2	6	1.36	0.33	NS	0.31
	D		2	6	0.56	0.60	NS	0.16
EOC	A	林型	2	6	5.22	0.05	*	0.64
	B		2	6	5.51	0.04	*	0.65
	C		2	6	1.67	0.27	NS	0.36
	D		2	6	1.04	0.41	NS	0.26
MBC	A	林型	2	6	2.93	0.13	NS	0.50
	B		2	6	0.23	0.81	NS	0.07
	C		2	6	0.06	0.95	NS	0.02
	D		2	6	0.65	0.55	NS	0.18
DOC	A	林型	2	6	1.72	0.26	NS	0.36
	B		2	6	0.82	0.49	NS	0.21
	C		2	6	0.06	0.95	NS	0.02
	D		2	6	35.20	4.85×10^{-4}	*	0.92
CMI	A	林型	2	6	1.64	0.27	NS	0.35
	B		2	6	3.00	0.13	NS	0.50
	C		2	6	0.58	0.59	NS	0.16
	D		2	6	0.44	0.66	NS	0.13
CPI	A	林型	2	6	0.61	0.57	NS	0.17
	B		2	6	0.26	0.78	NS	0.08
	C		2	6	1.73	0.26	NS	0.37
	D		2	6	0.31	0.75	NS	0.09
LI	A	林型	2	6	0.92	0.45	NS	0.24
	B		2	6	1.17	0.37	NS	0.28
	C		2	6	0.57	0.59	NS	0.16
	D		2	6	0.03	0.97	NS	0.01
L	A	林型	2	6	0.92	0.45	NS	0.24
	B		2	6	1.17	0.37	NS	0.28
	C		2	6	0.57	0.59	NS	0.16
	D		2	6	0.03	0.97	NS	0.01

注：Effect 为自变量或交互性名称，DFn 为分子自由度（效应因子的自由度），DFd 为分母自由度（残差的自由度），GES 为广义 η^2。SOC 为土壤有机碳，ROC 为惰性有机碳，MBC 为微生物生物量碳，EOC 为易氧化有机碳，DOC 为可溶性有机碳，CMI 为碳库管理指数，CPI 为碳库指数，LI 为碳库活度指数，L 为碳库活度。*表示 $P<0.05$，NS 表示 $P\geq0.05$。

元素在不同森林类型间无显著性差异。此外，研究区同属同一气候带，地理距离相对较近，该区域温度、降水等气候条件高度相似，可能削弱了植被类型对有机碳分解与积累的差异化影响。

同一林型中，不同土层之间有机碳及其组分差异显著且土层对其具有较好的解释率，推测是因为受到雨水的自然渗透，土壤有机碳及其组分向下周转的结果。然而，不同林分类型土壤碳向下周转的速率存在差异。阔叶混交林和针阔混交林中的易氧化有机碳向下周转的速率高于针叶纯林，尤其在 40 cm 土深以后。这主要与阔叶树种较高质量的凋落物输入、较深的根系分布以及活跃的微生物群落活动有关[39]，这些因素共同促进易氧化有机碳沿剖面的向下迁移与矿化[40-41]。此外，阔叶混交林和针



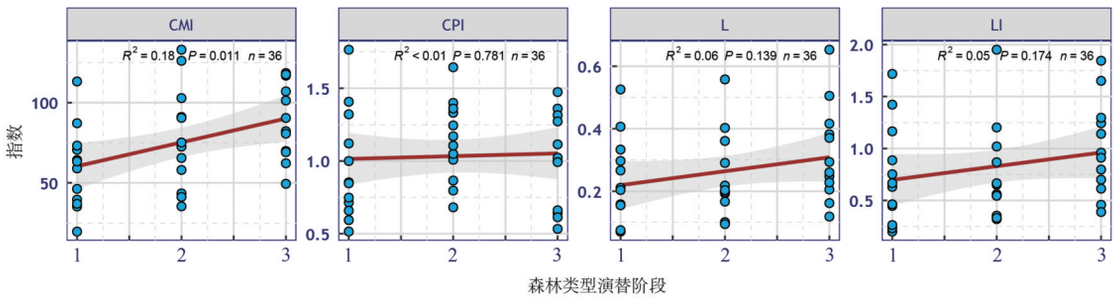
误差类型为标准误,不同小写字母表示同一森林类型的不同土层之间差异显著,不同大写字母表示同一土层的不同森林类型之间差异显著。KYH表示阔叶混交林,ZKH表示针阔混交林,ZYC表示针叶纯林。SOC为土壤有机碳(g/kg),ROC为惰性有机碳(g/kg),MBC为微生物生物量碳(mg/kg),EOC为易氧化有机碳(g/kg),DOC为可溶性有机碳(mg/kg),CMI为碳库管理指数,CPI为碳库指数,LI为碳库活度指数,L为碳库活度。

图1 不同森林类型土壤有机碳及组分含量

Fig. 1 Soil organic carbon and its fractions under different forest types

叶纯林土壤微生物生物量碳向下周转的速率高于针阔混交林,尤其在20 cm土层以后,这可能源于前者碳源输入的持续性与后者土壤环境异质性较大所致[42]。

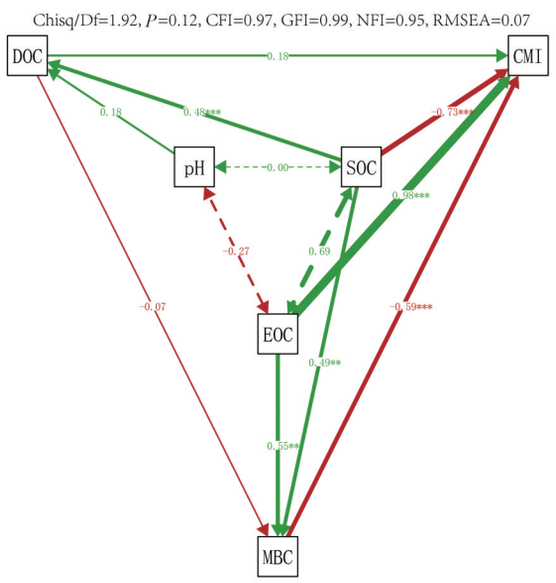
易氧化有机碳是引起土壤碳库容量变化的因子之一,也是土壤有机碳中最为敏感和周转速率最快的组分,可用于表征土壤碳库(如植物群落环境和土壤环境)早期变化,同时也作为土壤肥力变化的指标之一[43-44]。本研究中,阔叶混交林和针阔混交林土壤易氧化有机碳显著高于针叶纯林,暗示演替后期的土壤易氧化有机碳对植物和土壤环境具有更好的预测性,碳库存储和流转系统更加完善,这和已有研



图中CMI表示碳库管理指数，CPI表示碳库指数，L表示碳库活度，LI表示碳库活度。KYH表示阔叶混交林，ZKH表示针阔混交林，ZYC表示针叶纯林，1表示针叶纯林阶段，2表示针阔混交林阶段，3表示阔叶混交林阶段；R^2为模型决定系数，表征自变量能够解释因变量总变异的比例。

图2　不同森林类型土壤碳库质量指数

Fig. 2　Soil carbon pool quality index of different forest types



DOC为可溶性有机碳，MBC为微生物生物量碳，CMI为碳库管理指数，SOC为有机碳，EOC为易氧化有机碳。

图3　不同森林类型土壤碳库质量影响因素的路径分析

Fig. 3　Path analysis of factors influencing soil carbon pool quality in different forest types

究类似[45-47]。土壤碳库管理指数表明土壤碳库在稳定性方面有所提高，在针叶纯林→针阔混交林→阔叶混交林演替过程中，土壤碳库管理指数逐渐增加，暗示阔叶混交林土壤碳库稳定性较针阔混交林和针叶纯林高。回归分析结果表明，演替阶段与碳库管理指数之间存在显著的线性关系。然而，方差分析未能检出不同分组均值之间的显著差异。这可能是由于方差分析在将连续自变量离散化时损失了趋势信息，同时组内变异较大、统计功效不足，从而掩盖了整体的线性趋势。因此，结果提示演替阶段对碳库管理指数的作用主要体现为连续梯度效应，而非离散水平之间的显著均值差异。

5　结论

土层是贵州高海拔地区主要森林生态系统土壤有机碳及其组分含量分异的因素而非森林类型。演替后期的林型土壤易氧化有机碳向下周转速率较快。无论是森林类型还是土层，对碳库质量指数的影响均不显著，但随演替阶段推进呈上升趋势，演替后期的阔叶混交林的碳库稳定性最高。土壤易氧化有机碳的积累可能是影响不同森林土壤碳库稳定性的重要因素。

参考文献：

[1]　徐来仙，何友均，艾训儒，等. 基于森林生态系统服务权衡与协同的森林可持续管理[J]. 生态学报，2024，44(4)：1347-1359.

[2]　马学威，熊康宁，张　俞，等. 森林生态系统碳储量研究进展与展望[J]. 西北林学院学报，2019，34(5)：62-72.

[3]　刘世荣，王　晖，栾军伟，等. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. 生态学报，2011，31(19)：5437-5448.

[4]　方精云，陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报，2001，43(9)：967-973.

[5]　韦新良，周国模，余树全. 森林景观分类系统初探[J]. 中南林业调查规划，1997，16(3)：41-44+51.

[6]　李永平. 森林立地类型划分研究进展[J]. 山西林业，2024(S1)：28-29.

[7]　王　兵，王　燕，赵广东，等. 中国森林生态系统碳平

衡研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2008,29(2):194-199.

[8] KOORNEEF G J, PULLEMAN M M, COMANS R N, et al. Assessing soil functioning: What is the added value of soil organic carbon quality measurements alongside total organic carbon content?[J]. Soil Biology and Biochemistry,2024,196:109507.

[9] WIESMEIER M, URBANSKI L, HOBLEY E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils: A review of drivers and indicators at various scales[J]. Geoderma,2019,333:149-162.

[10] WASNER D, ABRAMOFF R, GRIEPENTROG M, et al. The role of climate, mineralogy and stable aggregates for soil organic carbon dynamics along a geoclimatic gradient[J]. Global Biogeochemical Cycles,2024,38(7):e2023GB007934.

[11] 胡建文,刘常富,勾蒙蒙,等. 马尾松人工林土壤有机碳及其组分对林龄的响应及驱动因素[J]. 林业科学,2025,61(6):75-84.

[12] 李科伟,徐仁扣. 碳循环在土壤酸化与调控中的作用[J]. 土壤,2025,57(3):485-497.

[13] WU B J,ZHANG M,ZHAI Z,et al. Soil organic carbon, carbon fractions, and microbial community under various organic amendments[J]. Scientific Reports, 2024, 14:25431.

[14] XUE S Q, LI X Y, FU Y R, et al. New insights into organic carbon mineralization: Combining soil organic carbon fractions, soil bacterial composition, microbial metabolic potential, and soil metabolites[J]. Soil and Tillage Research,2024,244:106243.

[15] CHEN L, ZHOU S L, ZHANG Q, et al. Effect of organic material addition on active soil organic carbon and microbial diversity: A meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research,2024,241:106128.

[16] 王 谦,吴新亮,关颖慧. 水热变化对玉龙雪山不同海拔森林土壤剖面有机碳矿化的影响[J]. 水土保持研究,2025,32(6):47-56.

[17] 雷俊杰. 亚热带不同地带杉木人工林土壤有机碳累积的微生物效应研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2025.

[18] LUN F, LI W H, LIU Y. Complete forest carbon cycle and budget in China, 1999-2008[J]. Forest Ecology and Management,2012,264:81-89.

[19] JANDL R, LINDNER M, VESTERDAL L, et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?[J]. Geoderma,2007,137(3/4):253-268.

[20] 刘 娜,周 华. 土壤有机碳分组及测定方法研究概述[J]. 贵州林业科技,2024,52(3):75-81.

[21] 赵盼盼. 中亚热带戴云山不同海拔黄山松林土壤有机碳和微生物特性的变化[D]. 福州:福建师范大学,2019.

[22] 王 珍,常顺利,王冠正,等. 天山中段北坡森林土壤有机碳库稳定性组分沿海拔的分异规律[J]. 生态学报,2023,43(18):7390-7402.

[23] 王 硕. 贵州草海北岸不同地貌环境对土壤养分及重金属的影响[D]. 贵阳:贵州民族大学,2022.

[24] 侯春兰,杨 瑞,杨宝勇,等. 贵州威宁草海不同土地利用类型土壤理化性质研究[J]. 林业资源管理,2020(5):138-143.

[25] 王运曦,丁访军,周 华,等. 高海拔地区3种林分类型土壤酶活性与微生物生物量特征[J]. 森林与环境学报,2025,45(1):11-19.

[26] 王天佑,夏品华,林 陶,等. 贵州草海湿地不同生境周丛生物碳、氮、磷生态化学计量学[J]. 湖泊科学,2021,33(3):774-784.

[27] 焦 欢,李廷亮,高继伟,等. 培肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(5):208-213.

[28] 董玉清,官 鹏,卢 瑛,等. 猫儿山不同海拔土壤有机碳组分构成及含量特征[J]. 土壤通报,2020,51(5):1142-1151.

[29] 王 娜,朱小叶,方 晰,等. 中亚热带退化林地土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳的变化[J]. 水土保持学报,2018,32(3):218-225+234.

[30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[31] BROOKES P C, LANDMAN A, PRUDEN G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985,17(6):837-842.

[32] 贾匡迪,王勇强,高 雨,等. 山西太岳山不同针叶纯林及混交林土壤有机碳库的变异性[J]. 东北林业大学学报,2024,52(3):112-118.

[33] WICKHAM H, AVERICK M, BRYAN J, et al. Welcome to the tidyverse[J]. Journal of Open Source Software,2019,4(43):1686.

[34] WICKHAM H. ggplot2:Elegant Graphics for Data Anal-

ysis[M]. New York,NY:Springer New York,2009.

[35] ROSSEEL Y. lavaan: An*R*Package for structural equation modeling[J]. Journal of Statistical Software,2012,48(2):1-36.

[36] SACHA E. semPlot: Path diagrams and visual analysis of various SEM packages′ output[EB/OL]. (2025-09-01)[2025-11-13]. https://CRAN. R-project. org/package=semPlot.

[37] 卢德浩,郑峰霖,古佳玮,等. 不同林分类型凋落物和土壤水源涵养能力分析与评价[J]. 生态环境学报,2025,34(1):26-35.

[38] 刘晓静. 天马保护区典型林分类型凋落物分解动态及其对土壤性质的影响[D]. 合肥:安徽农业大学,2021.

[39] ELIAS D M O,MASON K E,GOODALL T,et al. Microbial and mineral interactions decouple litter quality from soil organic matter formation[J]. Nature Communications,2024,15:10063.

[40] MORENO-DUBORGEL M, GOSHEVA-ONEY S, GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ B, et al. Shifting carbon fractions in forest soils offset ^{14}C-based turnover times along a 1700 m elevation gradient[J]. Global Change Biology,2025,31(7):e70326.

[41] ZHOU Z H,REN C J,WANG C K,et al. Global turnover of soil mineral-associated and particulate organic carbon[J]. Nature Communications,2024,15:5329.

[42] YANG K,ZHU J J,ZHANG W W,et al. Comparison of soil chemical and microbial properties in monoculture larch and mixed plantations in a temperate forest ecosystem in Northeast China[J]. Ecological Processes,2022,11(1):12.

[43] 石亚攀,陈立新,段文标,等. 红松针阔混交林林隙土壤总有机碳和易氧化有机碳的时空异质性研究[J]. 水土保持学报,2013,27(6):186-192.

[44] 张　哲,王邵军,李霁航,等. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应[J]. 生态学报,2019,39(17):6257-6263.

[45] 齐思明. 不同林龄落叶松林对黑土土壤团聚体酶活性和易氧化有机碳的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2017.

[46] 王浩东,陈　梦,袁丛军,等. 马尾松纯林阔叶化改造对土壤碳氮固持的短期效应[J]. 中南林业科技大学学报,2024,44(10):126-137.

[47] 郑　路,蔡道雄,卢立华,等. 南亚热带不同树种人工林生态系统碳库特征[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(12):110-116.