

多代连栽对桉树人工林不同土层土壤有机碳组分特征及碳库管理指数的影响

赵隽宇¹, 陆珍先², 王家妍², 唐健¹, 王嘉琛³, 黄小芮¹, 石媛媛¹

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院 广西林用新型肥料研发中心/广西林业实验室 南宁 530002; 2. 广西国有高峰林场, 南宁 530025; 3. 中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要: [目的] 揭示多代连栽下桉树人工林土壤有机碳组分在剖面中的分异机制, 针对连栽引起的衰退问题, 探索可持续经营策略并提供理论支撑。[方法] 采用空间序列代替时间的方法, 选取广西高峰林场一代(T_1)、二代(T_2)、三代(T_3)的桉树人工林以及作为对照的马尾松林(CK), 共203个采样点, 分析了0—20 cm和20—40 cm土层的土壤pH值、有机质、养分元素及土壤总有机碳(TOC)、土壤易氧化碳含量(EOC)、可溶性有机碳(DOC)等碳组分含量, 并引入土壤碳库管理指数(Carbon Pool Management Index, CPMI)评估了土壤碳库质量。[结果] (1) 随连栽代次增加, 0—20 cm土层TOC和EOC含量显著降低(TOC: 14.43~10.17 g/kg; EOC: 3.32~3.11 g/kg), DOC含量以 T_2 最高(0.44 g/kg), 显著高于CK(0.24 g/kg); 20—40 cm土层TOC亦呈下降趋势(7.01~5.37 g/kg), 但EOC和DOC差异不显著。(2) 连栽林分0—20 cm土层CPMI(69.33~77.87)显著低于CK(100.0), 20—40 cm土层CPMI则随代次增加递减($T_1 \rightarrow T_3$: 172.16→120.05), 表明连栽导致表层土壤碳库质量退化, 深层土壤碳活性受代次影响更显著。(3) 冗余分析显示, 0—20 cm土层TOC主要受TN和OM驱动, DOC与Fe、TP含量正相关, EOC与Zn、Cu正相关; 20—40 cm土层TOC受AN和OM影响显著, DOC与Cu、Mg相关性较强。[结论] 桉树多代连栽导致土壤有机碳库稳定性下降, 碳库管理需结合代次差异及土层特性优化施肥与凋落物管理, 建议采取合理的混交轮作、施肥管理等措施以维持和提升土壤碳储量和质量。

关键词: 土壤碳库; 人工林经营; 有机碳结构; 碳库管理指数

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0255-09

Impact of multi-generation continuous planting on soil organic carbon fractions and carbon pool management index in different soil layers of *Eucalyptus* plantations

Zhao Junyu¹, Lu Zhenxian², Wang Jiayan², Tang Jian¹, Wang Jiachen³, Huang Xiaorui¹, Shi Yuanyuan¹

(1. Guangxi Research and Development Center for New Forestry Fertilizer/Guangxi Forestry Laboratory, Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Science Research Institute, Nanning 530002, China; 2. Guangxi Gaofeng State Owned Forest Farm, Nanning 530025, China; 3. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the differentiation mechanisms of soil organic carbon components along the soil profile under multi-generation continuous planting of *Eucalyptus* plantations, thereby providing theoretical support for sustainable management strategies to mitigate the decline in site productivity caused by continuous planting. [Methods] Using a space-for-time substitution approach, a total of 203 sampling points were established in the first-generation (T_1), second-generation (T_2), and third-generation (T_3) *Eucalyptus*

收稿日期: 2025-06-05

修回日期: 2025-06-23

接受日期: 2025-07-08

资助项目: 广西自然科学基金(2022GXNSFBA035630); 中央引导地方科技发展资金项目(桂科ZY22096012); 国家自然科学基金(32360374); 广西自筹经费林业科技项目(2024GXZCLK21); 广西林科院研究团队项目(2024RT13)

第一作者: 赵隽宇(1994—), 男, 云南陆良人, 硕士, 工程师, 主要从事土壤资源与环境研究。E-mail: 779343445@qq.com

通信作者: 石媛媛(1979—), 女, 河南范县人, 博士, 正高级工程师, 主要从事地理信息系统研究。E-mail: 57633590@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

plantations, along with *Pinus massoniana* forests (CK) as a control in Guangxi Gaofeng State Owned Forest Farm. Soil pH value, organic matter, nutrient elements, and carbon fractions—including soil total organic carbon (TOC), soil easily oxidized carbon (EOC), dissolved organic carbon (DOC), and other carbon fractions—were analyzed in the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers. The carbon pool management index (CPMI) was introduced to assess soil carbon pool quality. [Results] (1) With increasing continuous planting generations, the TOC and EOC contents in the 0—20 cm soil layer decreased significantly (TOC: 14.43~10.17 g/kg; EOC: 3.32~3.11 g/kg), and the DOC content was highest in the T₂ (0.44 g/kg), which was significantly higher than in the CK (0.24 g/kg). In the 20—40 cm soil layer, TOC also showed a decreasing trend (7.01~5.37 g/kg), but the differences between EOC and DOC were not significant. (2) The CPMI of the 0—20 cm soil layer in the continuous planting stands (69.33~77.87) was significantly lower than that of the CK (100.0), while the CPMI of the 20—40 cm soil layer decreased with the increase of planting generations (T₁→T₃: 172.16→120.05), indicating that the quality of the surface soil carbon pool was degraded by continuous planting, and the carbon activity in the subsoil was more significantly affected by the planting generations. (3) Redundancy analysis showed that TOC in the 0—20 cm soil layer was mainly driven by total nitrogen (TN) and organic matter (OM), DOC was positively correlated with Fe and total phosphorus (TP) content, and EOC was positively correlated with Zn and Cu. TOC in the 20—40 cm soil layer was significantly affected by available nitrogen (AN) and OM, while DOC showed strong correlations with Cu and Mg. [Conclusion] Multi-generation continuous planting of *Eucalyptus* leads to a decline in the stability of soil organic carbon pools. Carbon pool management should consider generational differences and soil layer characteristics to optimize fertilization and litter management. It is recommended to take reasonable measures such as mixed planting, rotation, and fertilization management to maintain and enhance soil carbon storage and quality.

Keywords: soil carbon pool; plantation management; organic carbon structure; carbon pool management index

桉树(*Eucalyptus* spp.)人工林作为全球范围内广泛种植的重要森林资源^[1],因其生长迅速、适应性强和经济效益显著,被广泛种植用于木材生产、纸浆造纸、生物质能源等领域,对于保障木材供应、减缓全球气候变化和增加碳汇储量等方面具有重要作用^[2]。我国自1980年引入桉树并进行大规模种植^[3],然而,随着连栽代次的增加,土壤质量及生态功能存在不同程度的下降^[4-5]。土壤有机碳是土壤肥力的重要指标,对土壤结构、水分保持、养分循环等具有重要影响^[6],同时又受到经营管理措施、土壤理化性质等反向作用,其中,活性碳组分的变化更为敏感^[7],因此,探讨不同连栽代次桉树人工林土壤活性有机碳特征及其影响因素,对于理解桉树人工林的土壤生态效应,以提供合理的森林管理措施和实现减少碳排放的目标具有重要意义。

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)作为陆地生态系统中最大的碳库,是评价土壤质量的关键指标之一,同时,不同生态系统的有机碳储量及组分变化,反映生态系统截留SOC的能力^[8],其主要受到有机质的输入与凋落物的分解-迁移速率的动态变化影响。在土壤有机碳库中,活性有机碳的活性较高、周转速率较快,直接参与土壤生物、化学的转化过程,如易氧化

有机碳(Easily Oxidizable Organic Carbon, EOC)、可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)等,可快速表征环境变化引起的土壤碳库变化,并对土壤碳库的变化有着强烈的响应。孔令迁等^[9]调查了云南哀牢山的阔叶原生林生态系统,探讨了同一个森林生态系统不同样地中多个树种根际范围内DOC变化规律和影响有机碳储量的环境因子,认为环境因子与植被类型会显著影响DOC以及TOC含量。游巍斌等^[10]为研究土地利用/覆盖变化对土壤碳含量的影响,采集了林缘周边不同林距的土壤样品,分析TOC, DOC和微生物生物量碳(Microbial Biomass Carbon, MBC)含量变化及影响因素,认为土地利用方式的转变会显著影响土壤碳含量(TOC和DOC最为明显)。罗娜娜等^[11]以中国西南喀斯特石漠化植被恢复区为研究对象,探讨了植被恢复对于土壤有机碳的影响因素,发现植被恢复明显改善了研究区土壤总有机碳的分布和积累,同时对于活性有机碳的占比提升有促进作用。目前的研究表明,土壤碳各组分含量及其变化过程受土壤理化性质、植被类型^[12]及利用方式^[13]和林龄等^[14]多因素的综合影响,同时EOC, DOC是土壤中较易氧化分解的有机碳组分,可以有效反映土壤有机碳早期变化特征。

土壤碳库管理指数(Carbon Pool Management Index, CPMI)^[15]则体现了有机碳库中各组分在量和质上的变化特征,被认为是评估土壤质量和土地管理的关键指标,较单一活性有机碳指标具有更高的生态敏感性。这一特性使其成为评估土壤质量演变和土地管理效应的关键诊断工具:CPMI值的正向增长表征土壤碳库稳定性增强和生态功能提升,而负向变化则揭示土壤肥力退化过程。碳库管理指数在土壤质量评价中的应用具有重要意义,它可以帮助我们更好地理解土壤有机碳的动态变化及其影响因素,为土壤管理和优化营林措施提供科学依据。近年来,关于碳库管理指数的研究逐渐增多,主要集中在不同生态恢复模式、氮沉降条件下、外源有机物添加^[16]、不同土地利用方式^[17]、不同还田方式等^[18]方面。这些研究结果表明,碳库管理指数能够敏感地反映土壤有机碳的动态变化及其影响因素^[19],为土壤管理和优化营林措施提供科学依据。然而,关于多代连栽对桉树人工林不同土层土壤有机碳组分特征及碳库管理指数的影响研究相对较少,特别是多代连栽这一特殊经营模式对土壤碳库的深层影响机制尚未阐明,同时土壤有机碳组分在土壤中的含量和周转特征对于理解土壤质量变化具有重要意义^[20],因此,探讨多代连栽对桉树人工林不同土层土壤有机碳组分特征及碳库管理指数的影响,一方面对于填补多代连栽经营措施对土壤碳库影响的空白,另一方面对于理解土壤质量变化、优化营林措施具有重要意义。

本研究选取我国南方地区不同代次桉树人工林作为研究对象,采用空间序列代替时间的研究思路,构建“连栽代次-活性碳组分-碳库指数”研究框架,对不同土层土壤样品进行采集和分析,测定土壤肥力指标及土壤有机碳组分含量,并引入土壤碳库管理指数(CPMI)评估不同代次桉树人工林土壤碳库质量,重点解决以下几个问题:(1)连栽代次是如何影响不同土层活性碳组分的分布特征。(2)揭示多代连栽条件下土壤有机碳组分的影响因素。(3)CPMI能否作为评估连栽效应的敏感指标。旨在通过以上研究,系统解析不同代次桉树林的土壤有机碳及组分的演变规律,研究成果将为人工林碳汇管理提供新的理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样地选择

本研究在广西高峰林场进行,该林场是我国重要的桉树人工林种植基地之一,林地主要分布在桂中、桂

东南区域。研究区域位于北纬22°32'—22°57',东经108°14'—108°49',属于亚热带季风气候区,年均气温约21.6℃,年均降水量约1600mm,地貌类型以丘陵为主,海拔普遍在200m以下,土壤类型以第四纪红土母质、砂页岩发育而来的红壤为主。研究以同一纬度为划分依据,采用时空替换法选择3个连栽代次(各代次间的时间间隔均为6a),一代(T₁,2022年造林)、二代(T₂,2016年造林)、三代(T₃,2010年造林)的桉树人工林以及作为对照的马尾松林(CK),共计203个采样点,如图1所示。林下植被类型主要有飞机草(*Chromolaena odorata*)、鬼针草(*Bidens pilosa* L.)、铁芒箕(*Dicranopteris dichotoma*)、刺茄(*Solanum virginianum* L.)、牛白藤(*Hedyotis hedyotide*)。

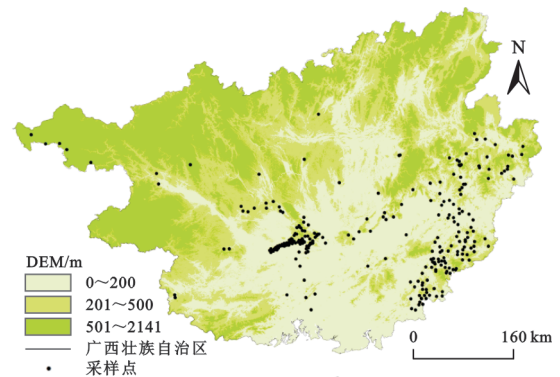


图1 研究区采样点分布情况

Fig. 1 Distribution of sampling points in study area

1.2 样品采集与处理

土壤样品采集时间为2023年10月—2024年2月,结合林场林班图,采用GIS网格化布点的方式进行采样点布设,结合实际情况,在方圆500m范围内选择合适的区域进行样品采集,在采样区域内,按照“S”形5点取样法采集0—20,20—40cm土层的土壤样品,混合、做好标记后装入自封袋带回,到实验室后,去除根系、石块等杂质,自然风干后过2mm筛备用。

1.3 测定指标与方法

土壤酸碱度采用pH计测定,水土体积(L)质量(kg)比为2.5:1。全氮(Total Nitrogen, TN)、碱解氮(Alkali-hydrolyzable Nitrogen, AN)采用凯式定氮法测定;全磷(Total Phosphorus, TP)采用碱熔-钼锑抗分光光度法;全钾(Total Potassium, TK)及速效钾(Available Potassium, AK)含量采用火焰光度法测定;有效磷(Available Phosphorus, AP)采用全自动间断分析仪测定;中、微量元素采用元素分析仪测定;土壤总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)采用元素分析仪(Vario isotope cube,德国)测定;采用333mol/L KMnO₄氧化法测定土壤易氧化碳含量(EOC);可溶性有机碳(DOC)含量的测定采用去离

子水浸提,碳氮分析仪测定。

1.4 土壤碳库管理指数

土壤碳库管理指数(CPMI)是表征土壤碳库变化的一个重要量化指标,在森林经营中,其能够量化经营管理措施对土壤有机碳的培肥作用^[21]。当 CPMI 值升高时,表明经营方式对土壤有培肥作用,土壤性能向良性发展;反之,则表明土地经营措施对林地质量有负面影响,其计算公式如下:

$$L = \frac{EOC}{SOC - EOC} \quad (1)$$

$$LI = \frac{L}{L_{CK}} \quad (2)$$

$$CPI = \frac{SOC}{SOC_{CK}} \quad (3)$$

$$CPMI = CPI \times LI \times 100 \quad (4)$$

式中:L为碳库活度;EOC为易氧化碳含量;LI为碳库活度指数;CPI为碳库指数;CPMI为碳库管理指数;SOC为土壤有机碳; L_{CK} 为对照土壤中碳库活度; SOC_{CK} 为对照土壤中有机碳含量。

表 1 不同代次桉树人工林 0-20 cm 土壤 pH 值、有机质及养分指标特征

Table 1 Characteristics of soil pH, organic matter, and nutrients in 0-20 cm layer of *Eucalyptus* plantations with different planting generations

区组	pH值	OM/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TK/ (g·kg ⁻¹)	AN/ (mg·kg ⁻¹)	AP/ (mg·kg ⁻¹)	AK/ (mg·kg ⁻¹)	B/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	Fe/ (mg·kg ⁻¹)	Ca/ (mg·kg ⁻¹)	Mg/ (mg·kg ⁻¹)
T ₁	4.43±0.25a	20.69±7.47b	1.04±0.38b	0.28±0.11a	18.91±8.32a	157.28±52.85a	0.94±1.47a	72.91±50.37a	0.18±0.05a	0.98±0.64b	2.71±3.06a	208.29±138.88a	154.47±143.79a	10.03±5.87a
T ₂	4.38±0.33a	19.78±7.45b	1.10±0.43b	0.31±0.26a	19.34±7.83a	139.74±49.11a	0.67±0.83b	56.11±37.81b	0.17±0.05a	1.08±0.71b	2.13±0.71a	235.23±181.61a	190.17±285.39a	8.58±4.32a
T ₃	4.44±0.19a	19.06±6.61b	1.24±0.61a	0.34±0.19a	19.51±6.83a	142.25±42.49a	0.81±1.37b	63.88±33.49a	0.16±0.09a	1.51±1.16b	1.66±0.88b	178.57±119.02a	93.62±65.45a	9.17±4.16a
CK	4.39±0.23a	23.15±8.91a	1.13±0.30b	0.28±0.16a	7.87±8.28b	129.45±51.65a	0.51±0.04c	16.97±31.61c	0.13±0.18a	2.51±2.35a	2.36±1.30a	236.90±198.38a	129.36±228.91a	9.15±2.19a

注:pH值为酸碱度,OM为有机质,TN为全氮,TP为全磷,TK为全钾,AN为碱解氮,AP为有效磷,AK为速效钾,B为有效硼,Cu为有效铜,Zn为有效锌,Fe为有效铁,Ca为有效钙,Mg为有效镁。同一列不同小写字母表示差异性显著($p < 0.05$),下同。

不同代次桉树人工林 20—40 cm 土壤性质见表 2,各处理间 pH 值在 4.13~4.53,CK 组 pH 值(4.53),显著高于连栽处理($p < 0.05$),有机质含量变化范围为 9.26~12.08 g/kg,整体波动较小,各处理间并未表现出显著差异性($p > 0.05$)。TN 含量最高为 T₃ 组,达到 1.12 g/kg,显著高于其余处理($p < 0.05$),而 T₁, T₂ 组虽略高于 CK,但统计上未达显著水平。TP 含量以 T₁ 组最高(0.64 g/kg),显著超过其他所有组别

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 值、有机质及养分指标特征

在本研究中,采用时空替换法选择不同代次的桉树人工林,以及一个对照组(CK),对这些森林的土壤性质 0—20 cm 进行全面分析,结果见表 1。各处理的 pH 值范围为 4.38~4.44,波动较小,各处理组间无显著差异($p > 0.05$),而在有机质方面变化范围在 19.06~23.15 g/kg,CK 处理显著高于连栽处理组($p < 0.05$),T₃ 处理全氮含量显著高于其他处理($p < 0.05$),可能是由于长期施肥增加林地土壤全量养分的储备。速效养分中,AN,AP,AK 含量最高的均为 T₁,分别是 157.28,0.94,72.91 mg/kg,同时 CK 组显著低于连栽林分($p < 0.05$)。在微量元素中,除有效铜外,大部分微量金属元素在不同区组间并未表现出显著差异性,同时有效硼含量差异也不显著($p > 0.05$),CK 组的土壤有效铜含量显著高于连栽林分($p < 0.05$),可能是由于土壤扰动较少,在一定程度上促进了铜含量的累积。

($p < 0.05$)。全钾(TK)含量在各组间差异明显,CK 组为 29.3 g/kg,显著高于其他各组($p < 0.05$)。AN 在 CK 组中表现出最高值(176.87 mg/kg)显著优于其他处理组($p < 0.05$)。中、微量元素方面,各处理组间有效硼含量差异显著,T₁ 含量最高为 0.21 mg/kg ($p < 0.05$)。除有效钙 CK 组显著较高外($p < 0.05$),其余微量金属元素 CK 含量均处于较低水平,说明该区域本底土壤中钙元素较为充足。

表 2 不同代次桉树人工林 20-40 cm 土壤 pH 值、有机质及养分指标特征

Table 2 Characteristics of soil pH, organic matter, and nutrients in 20-40 cm layer of *Eucalyptus* plantations with different planting generations

区组	pH值	OM/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TK/ (g·kg ⁻¹)	AN/ (mg·kg ⁻¹)	AP/ (mg·kg ⁻¹)	AK/ (mg·kg ⁻¹)	B/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	Fe/ (mg·kg ⁻¹)	Ca/ (mg·kg ⁻¹)	Mg/ (mg·kg ⁻¹)
T ₁	4.24±0.2b	12.08±2.33a	0.84±0.15b	0.64±0.11a	22.61±7.45b	113.44±54.67b	0.33±0.12b	51.67±12.65a	0.21±0.05a	1.19±0.44a	1.78±0.63a	140.59±67.44b	307.68±123.81a	5.24±0.91a
T ₂	4.13±0.19b	10.31±3.56a	0.95±0.21b	0.27±0.08b	20.93±12.05b	95.71±47.15b	0.57±0.25a	31.00±5.22b	0.14±0.02b	0.84±0.41a	1.47±0.67a	115.16±48.31c	137.7±48.55b	4.08±1.32a
T ₃	4.21±0.211b	9.26±1.98a	1.12±0.33a	0.19±0.03b	15.23±2.88c	75.2±25.09c	0.52±0.22a	22.63±8.21b	0.14±0.06b	0.97±0.53a	0.94±0.21b	106.01±74.12c	96.10±78.91b	4.53±1.08a
CK	4.53±0.05a	10.11±2.56a	0.82±0.13b	0.28±0.05b	29.3±5.92a	176.87±74.17a	0.25±0.07b	45.26±16.92a	0.11±0.04c	0.77±0.14b	1.05±0.44b	198.35±90.33a	49.08±34.94c	2.18±0.28b

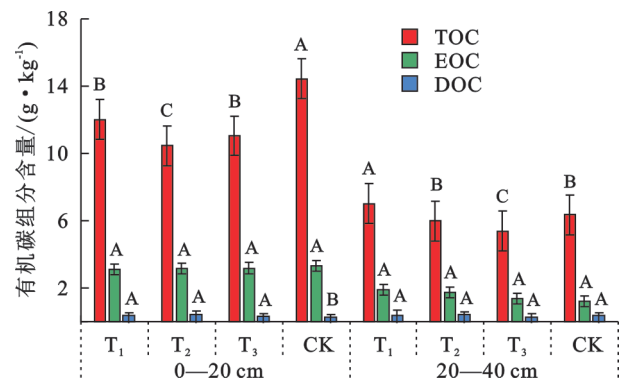
2.2 不同连栽代次桉树林土壤有机碳组分含量特征

不同连栽代次桉树林土壤有机碳组分含量特征如图 2 所示,不同连栽代次桉树人工林 0—20 cm 土壤 TOC, EOC, DOC 含量范围分别为 10.17~14.43, 3.11~3.32, 0.24~0.44 g/kg。CK 处理的 TOC, EOC 含量均显著高于连栽处理 ($p < 0.05$), 随连栽代次增加, TOC, EOC 含量呈现一定的下降趋势。连栽处理的 DOC 含量显著高于 CK 组 ($p < 0.05$), 其中 T₂ 处理的 DOC 含量为 0.44 g/kg, 为最大值。20—40 cm 土层中, TOC, ROC, DOC 含量范围分别是 5.37~7.01, 1.22~1.89, 0.26~0.42 g/kg, 与表层土类似, 随连栽代次增加, T₁ 处理的 TOC 含量显著高于其余处理 ($p < 0.05$), 且呈现一定的下降趋势, 但 ROC, DOC 含量在不同代次间差异并不显著 ($p > 0.05$), 可能是由于连栽的影响主要集中于表层, 对于深层次土壤的影响程度较小。

2.3 不同连栽代次桉树林土壤碳库管理指数分布特征

在本研究中,不同代次桉树人工林以及作为对照组的马尾松林(CK)的 0—20 cm, 20—40 cm 土层碳库活度指数(Lability Index, LI)、碳库指数(Carbon Pool Index, CPI)和碳库管理指数(CPMI)进行量化分析, 结果见表 3。0—20 cm 土层中, 碳库活度指数(LI), T₁ 的平均值为 0.936, 与 T₂ 的 0.955 和 T₃ 的 0.95 无显著差异 ($p > 0.05$), 但均略低于作为对照的马尾松林(CK)的 1.000, 说明连栽代次对于 LI 有一定的负面影

响。在碳库指数(CPMI)方面, T₁(0.832)、T₂(0.726)、T₃(0.766), 这三者之间虽无显著差异 ($p > 0.05$), 但显著低于对照马尾松林(CK)的 1.000 ($p < 0.05$)。连栽林分 CPMI 变化范围为 69.33~77.87, 这三者之间同样无显著差异 ($p > 0.05$), 但显著低于对照马尾松林(CK)的 100.0 ($p < 0.05$)。20—40 cm 土层中, 不同代次桉树人工林土壤 LI, CPMI 显著高于 CK, 但 CK 组的 CPI 处于中等水平, 显著高于 T₂, T₃ 处理 ($p < 0.05$), 其中 LI 最高的为 T₂(1.70), T₁, T₃ 处理组间 LI 并未表现出显著差异性 ($p > 0.05$)。从 CPMI 来看, T₁ 处理最高, 为 1.10, 显著高于 CK 处理组 ($p < 0.05$)。CPMI 中, 各处理间差异较为显著 ($p < 0.05$), 但 T₁, T₂, T₃ 的 CPMI 呈现逐渐下降的趋势。



注:不同大写字母表示同一土层中不同代次间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 不同连栽代次桉树林土壤有机碳组分含量特征
Fig. 2 Characteristics of soil organic carbon fractions in *Eucalyptus* forests with different continuous planting generations

表 3 不同代次桉树人工林 0—20 cm, 20—40 cm 土壤碳库质量特征

Table 3 Characteristics of soil carbon pool quality in 0—20 cm and 20—40 cm layers of *Eucalyptus* plantations with different planting generations

项目	0—20 cm				20—40 cm			
	T ₁	T ₂	T ₃	CK	T ₁	T ₂	T ₃	CK
碳库活度指数 LI	0.936±0.301a	0.955±0.294a	0.957±0.314a	1.000±0.000a	1.55±0.581b	1.70±0.477a	1.42±0.719b	1.000±0.000c
碳库指数 CPI	0.832±0.405b	0.726±0.399b	0.766±0.316b	1.000±0.000a	1.10±0.256a	0.94±0.233c	0.84±0.361c	1.000±0.000b
碳库管理指数 CPMI	77.87±12.19b	69.33±11.73b	73.31±9.92b	100.0±0.00a	172.16±35.25a	160.49±29.64b	120.05±17.28c	100.0±0.00d

2.4 土壤有机碳组分影响因素

以土壤有机碳组分含量特征为响应变量, 土壤 pH 值、有机质及养分元素含量为解释变量, 对不同土层土壤养分特征与有机碳组分进行冗余分析, 结果如图 3 所示。在图 3A 中, 前两个轴 RDA1 和 RDA2 分别解释了总变异的 73.46% 和 2.05%, 在图 3B 中, 前两个轴 RDA1 和 RDA2 分别解释了总变异的 74.31% 和 11.42%, 表明这两个轴能够很好地捕捉数据中的变异性。通过图中箭头的大小和角度, 可以直观地看出 pH 值、有机质和养分特征对土壤有机碳组分的影响程度及其方向性。0—20 cm 土层中, 有

机碳组分(TOC, DOC, EOC)主要落在 1, 4 象限, 除 pH 值外, 其余土壤指标均与有机碳组分在同一象限内, 其中对 TOC 影响最为显著的是 TN, OM, Fe, TP 对 DOC 影响更为显著, EOC 主要与 Zn, Cu 更为相关。20—40 cm 土层中, 有机碳组分(TOC, DOC, EOC)主要落在 1, 4 象限, 除 AP, TP 外, 其余土壤指标均与有机碳组分在同一象限内, 其中对 TOC 影响最为显著的是 AN, OM, Cu, Mg 对 DOC 影响更为显著, EOC 主要与 TK 更为相关, 说明不同土层中, 有机碳组分的影响因素并不相同。

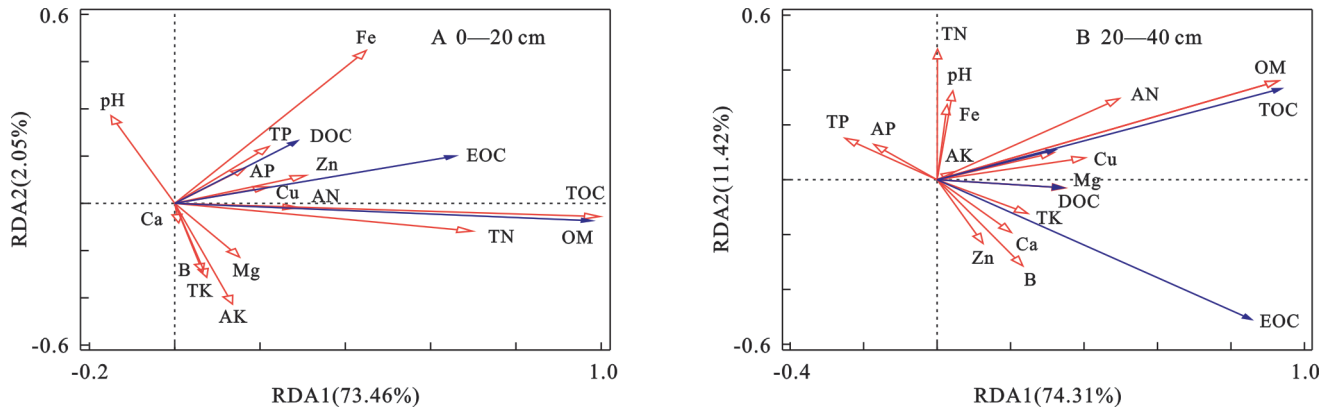


图3 土壤pH值、有机质、养分元素及有机碳组分的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil pH, organic matter, nutrient elements, and organic carbon fractions

3 讨论

3.1 桉树连栽对土壤肥力指标的影响

桉树连栽对土壤肥力的影响主要体现在土壤养分含量的变化上^[2]。桉树作为一种速生树种,虽然其生长过程中对土壤养分的吸收和利用效率较高,但由于连栽、全株利用的经营方式,导致回归土壤的养分含量较少,进而引起土壤养分存在不同程度的下降^[22]。首先是pH值方面,与CK相比,连栽处理组的0—20 cm, 20—40 cm的土壤pH值均有不同程度的下降,桉树根系分泌出的有机酸和其他代谢产物可能是引起土壤pH值下降的原因之一^[23],这种酸化现象不仅影响桉树自身的生长,还可能对其他植物的生长产生不利影响。桉树连栽对土壤有机质的影响同样不容忽视,本研究发现,桉树连栽会对引起土壤有机质含量大幅度下降,这种变化在表层(0—20 cm)的土层尤为显著,地表裸露以及剧烈的土壤扰动可能是导致有机质含量大幅下降的原因。由于大量施用化肥^[24],连栽代次的增加在一定程度上提高了表层0—20 cm土壤中的全量养分(TN, TP, TK等指标)的含量,与CK相比, T₃的TN, TP, TK含量分别提高了9.73%, 2.14%和147.23%,但这种累积在20—40 cm的土壤中并不显著,由于常规施肥主要作用于表层,深施肥料较少,导致深层土壤养分补充不足。速效养分中, 0—20 cm, 20—40 cm土壤的AP, AK含量,连栽处理组中也表现出显著高于CK的趋势,但AN在各处理间差异不显著。中、微量元素方面, 0—20 cm土壤有效硼含量在各处理间差异并不显著,但在20—40 cm中, CK土壤B含量显著低于连栽处理,可能与桉树根系以及凋落物分解产物的淋溶有关^[25]。但0—20 cm的土壤微量元素Fe, Ca, Mg等元素在不同处理间差异并不显著,一方面桉树在生长中会吸收大量的微量元素,另一方面,土壤自然演替、桉树单宁淋溶等^[26]可能在一定程度上

进行了微量元素的补充,实现盈亏平衡。

3.2 桉树连栽对土壤有机碳组分含量及碳库的影响

土壤有机碳及其组分含量的变化反映了土壤有机质的转化和稳定机制^[18]。本研究发现,随着桉树连栽代次的增加, 0—20 cm的土壤TOC含量显著低于CK,但土壤EOC和DOC均呈现先减小后增加再减小的趋势,这一发现与前人关于森林经营对土壤碳储量的影响研究相一致^[27]。连栽导致土壤TOC减少的原因可能包括:一方面,桉树种植过程中频繁的土壤扰动和根系呼吸作用增强,加速了土壤有机质的分解^[4];另一方面,连栽可能导致土壤养分失衡,进而影响植被生长和残体归还,减少了土壤有机碳的输入。在20—40 cm土层中,虽然TOC, EOC, DOC含量随着连栽代次的增加呈现一定的下降趋势,但T₃处理的EOC含量相比CK,仍有10.66%的提高,这表明EOC呈现较为明显的表聚特征,对深层土壤的影响相对有限。这可能与土壤剖面的物理、化学性质差异以及根系分布深度有关^[28],同时桉树连栽对土壤有机碳的转化和稳定机制产生了复杂影响。易氧化碳是土壤中最活跃的有机碳组分,植物和微生物利用率较高,但同时易受环境条件变化的影响。值得注意的是,尽管TOC和EOC随连栽代次增加而减少,但DOC含量却显著高于CK组,且在T₂处理中达到最大值。这一异常现象可能由多种因素共同导致:首先,连栽可能促进了土壤微生物的活动,微生物分解产物中DOC的比例增加;其次,连栽可能改变了土壤的物理结构,如孔隙度增加^[29],有利于DOC的溶出和迁移,DOC作为土壤碳流失的潜在风险因子,其含量增加应引起高度重视。总体而言,连栽对桉树林土壤有机碳组分含量具有显著影响,且这种影响在不同土层中表现出差异性。为了维持和提升土壤碳储量和质量,建议采取合理的轮作休耕、施肥管理等措施,以平衡土壤养分,促进植被生长和土壤碳固定。未来研究应进一步探索连栽对土壤碳循环的微观机

制,如土壤微生物群落结构、酶活性等的变化,以及这些变化如何与土壤碳组分动态相互作用。

4 结论

(1) 土壤肥力指标的变化:随着桉树连栽代次的增加,0—20 cm和20—40 cm土层的土壤pH值均呈现下降趋势,表明连栽可能导致土壤酸化。土壤有机质含量随连栽代次增加而显著下降,特别是在表层(0—20 cm)土壤中,这种变化尤为显著,表明连栽对土壤有机质有负面影响,全量养分在表层土壤中随连栽代次增加呈现一定累积趋势,但在深层土壤中差异不显著。AN在各处理间差异不显著,而AP, AK在连栽处理组中显著高于对照马尾松林(CK)。

(2) 土壤有机碳组分含量的变化。随着连栽代次增加,0—20 cm土层的TOC和EOC含量显著下降,DOC含量则呈现先减小后增加再减小的趋势,其中T₂处理DOC含量最高。在20—40 cm土层中,TOC含量随连栽代次增加呈下降趋势,但EOC和DOC含量在不同代次间差异较小,表明连栽对深层土壤有机碳组分的影响较小。

(3) 土壤碳库管理指数的变化。0—20 cm土层中,连栽处理的LI,CPI和CMI均显著低于CK处理,表明连栽对土壤碳库质量有负面影响。20—40 cm土层中,虽然连栽处理的LI和CMI显著高于CK处理,但CPI显著低于CK处理,且随连栽代次增加,CMI呈现逐渐下降的趋势。

(4) 土壤有机碳组分的影响因素。冗余分析结果表明,土壤pH值、有机质及养分元素含量对土壤有机碳组分含量有显著影响,但不同土层的影响因素并不相同,表层0—20 cm中,pH值对有机碳组分有一定的负面影响,而在20—40 cm中,AP,TP等对于有机碳组分影响负面,但土壤有机质和全氮含量与土壤有机碳组分含量在不同土层中均呈正相关关系。

综上所述,桉树连栽对土壤肥力及有机碳组分含量有显著影响,且这种影响在不同土层中表现出差异性。为了维持和提升土壤碳储量和质量,建议采取合理的轮作休耕、施肥管理等措施,以平衡土壤养分,促进植被生长和土壤碳固定。未来研究应进一步探索连栽对土壤碳循环的微观机制及其与土壤生态效应的相互关系,为桉树人工林的可持续经营和管理提供更加全面的科学依据。

参考文献(References):

[1] 吴兴澳,侯满福,刘雨婷,等.桉树林种植年限对林下植物及其种间关联的影响[J].生态学杂志,2025,44(3):736-744.

Wu X A, Hou M F, Liu Y T, et al. Effects of planting ages on understory plants and their interspecific associations in *Eucalyptus* plantations [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025,44(3):736-744.

[2] 韦向向,王晟强,唐健,等.桂南红壤区多代连栽桉树对土壤肥力的影响[J].西南林业大学学报:自然科学,2023,43(4):81-88.

Wei X X, Wang S Q, Tang J, et al. Effects of multi-generation continuous planting on soil fertility quality of *Eucalyptus* plantation in red soil area of southern Guangxi [J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2023,43(4):81-88.

[3] 杨章旗.广西主要用材林产业发展概况与展望[J].广西科学,2022,29(3):405-410.

Yang Z Q. Development situation and prospect of main timber forest industry in Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2022,29(3):405-410.

[4] Tang J, Zhao J Y, Qin Z Y, et al. Structural equation model was used to evaluate the effects of soil chemical environment, fertility and enzyme activity on *Eucalyptus* biomass [J]. Royal Society Open Science, 2023,10(4):221570.

[5] Xu Y X, Li C, Zhu W K, et al. Effects of enrichment planting with native tree species on bacterial community structure and potential impact on *Eucalyptus* plantations in Southern China [J]. Journal of Forestry Research, 2022,33(4):1349-1363.

[6] Wang D W, Bai J H, Wang W, et al. Comprehensive assessment of soil quality for different wetlands in a Chinese delta [J]. Land Degradation & Development, 2018,29(10):3783-3794.

[7] 李哲,张仲胜,李敏,等.黄河三角洲盐沼表层土壤有机碳含量、可溶性有机碳含量及其官能团结构特征[J].湿地科学,2019,17(6):645-650.

Li Z, Zhang Z S, Li M, et al. Contents of organic carbon and dissolved organic carbon and characteristics of functional group structure in surface soils of salt marshes in Yellow River Delta [J]. Wetland Science, 2019,17(6):645-650.

[8] 周子榆,王孟佳,冯向前,等.轮作模式和氮肥处理对稻田土壤有机碳储量及其结构的影响[J].中国水稻科学,2024,38(5):577-590.

Zhou Z Y, Wang M J, Feng X Q, et al. Effects of crop rotation patterns and nitrogen fertilizer levels on storage and structure of soil organic carbon in paddy fields [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2024,38(5):577-590.

[9] 孔令迁,刘宪斌,李云.不同树种对森林土壤可溶性有机碳空间异质性的影响[J].农学学报,2023,13(8):46-55.

Kong L Q, Liu X B, Li Y. Impacts of various tree species on spatial heterogeneity of soil dissolved organic

- carbon in forest ecosystems [J]. *Journal of Agriculture*, 2023, 13(8):46-55.
- [10] 游巍斌,李颖,周艳,等.武夷山国家公园马尾松林改为茶园后影响表层土壤碳含量的林缘效应[J]. *林业科学*, 2023, 59(10):41-49.
You W B, Li Y, Zhou Y, et al. Edge effect of *Pinus massoniana* forest converted into tea plantation on top-soil carbon content in Wuyishan National Park [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(10):41-49.
- [11] 罗娜娜,盛茂银,王霖娇,等.长期植被恢复对中国西南喀斯特石漠化土壤活性有机碳组分含量和酶活性的影响[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(6):867-881.
Luo N N, Sheng M Y, Wang L J, et al. Effects of long-term vegetation restoration on soil active organic carbon fractions content and enzyme activities in karst rocky desertification ecosystem of southwest China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(6):867-881.
- [12] 秦冬锐,黄懿梅,黄倩,等.黄土高原典型林草地不同土层微生物残体碳对土壤有机碳组分的贡献及其影响因素[J]. *环境科学*, 2024, 46(9):5705-5717.
Qin D R, Huang Y M, Huang Q, et al. Contribution of microbial necromass carbon to soil organic carbon fractions and its influencing factors in different soil layers of typical forest land and grassland in the Loess Plateau, China [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(9):5705-5717.
- [13] 朱文彬,张慧,张龙江,等.有机施肥对不同植物类土壤肥力与碳库的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(4):1014-1028.
Zhu W B, Zhang H, Zhang L J, et al. Effects of organic fertilization on soil fertility and carbon pool of different plant species [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(4):1014-1028.
- [14] 张广月,王海燕,张亦凡.不同种类落叶松人工林土壤有机碳特征及其影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2025, 31(3):371-382.
Zhang G Y, Wang H Y, Zhang Y F. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in larch plantations of different varieties [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2025, 31(3):371-382.
- [15] Qiu H S, Hu Z Z, Liu J Y, et al. Effect of biochar on labile organic carbon fractions and soil carbon pool management index [J]. *Agronomy*, 2023, 13(5):1385.
- [16] 周珺,王莹,孙德龙,等.长期施肥对设施土壤活性有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(4):760-768.
Zhou J, Wang Y, Sun D L, et al. Effects of long-term fertilization on soil labile organic carbon content and carbon pool management index in greenhouse [J]. *Soils*, 2024, 56(4):760-768.
- [17] 姚武扬眉,卓玛草,袁建钰,等.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤碳库及碳库管理指数的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2024, 59(5):277-285.
Yao W, Zhuo M C, Yuan J Y, et al. Effects of different land-use practices on soil carbon pool and its management index in Loess Hilly Region [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(5):277-285.
- [18] 刘雅杰,张天娇,张向前,等.秸秆还田下耕作方式对黑土活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(17):3408-3423.
Liu Y J, Zhang T J, Zhang X Q, et al. Effects of tillage methods under straw returning on the labile organic carbon fractions and carbon pool management index in black soil farmland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(17):3408-3423.
- [19] Vieira F C B, Bayer C, Zanatta J A, et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1/2):195-204.
- [20] 许毅隼,陈香碧,王军,等.我国东部典型气候区农田土壤易氧化碳含量与碳库管理指数特征[J]. *环境科学*, 2025, 46(3):1729-1736.
Xu Y J, Chen X B, Wang J, et al. Characteristics of easily oxidized soil carbon content and carbon pool management index in typical climate zones in Eastern China [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(3):1729-1736.
- [21] 褚俊智,沈育伊,牟芝熠,等.生物炭施用对桂北桉树人工林土壤碳库管理指数及有机碳化学结构的影响[J]. *环境科学*, 2025, 46(9):5682-5693.
Chu J Z, Shen Y Y, Mou Z Y, et al. Effects of biochar application on soil carbon pool management index and organic carbon chemical structure in *Eucalyptus* plantations in Northern Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(9):5682-5693.
- [22] Ren H, Qin X H, Huang B L, et al. Responses of soil enzyme activities and plant growth in a *Eucalyptus* seedling plantation amended with bacterial fertilizers [J]. *Archives of Microbiology*, 2020, 202(6):1381-1396.
- [23] Huang W W, Reddy G V P, Shi P J, et al. Allelopathic effects of *Cinnamomum septentrionale* leaf litter on *Eucalyptus grandis* saplings [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21:e00872.
- [24] 张挺,谢仕锦,卢翠香,等.施肥与密度对桉树无性系生长的影响[J]. *桉树科技*, 2022, 39(4):17-22.
Zhang T, Xie S J, Lu C X, et al. Effects of fertilization and density on the growth of *Eucalyptus* clones [J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2022, 39(4):17-22.
- [25] 陈晨.不同林龄桉树人工林土壤硼赋存及其影响因素[D].长沙:中南林业科技大学, 2022.
Chen C. The status and influence factors of soil boron in *Eucalyptus* plantations with different stand ages [D].

- Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022.
- [26] 谢志凤. 桉树单宁淋溶对土壤铁铝锰氧化物形态和土壤团聚体的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- Xie Z F. Effects of *Eucalyptus* tannin leaching on soil Fe, Al, and Mn oxide forms and soil aggregates [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [27] 杨传宝, 倪惠菁, 苏文会, 等. 经营措施对毛竹林土壤不同组分有机碳、氮及化学结构的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 25-34.
- Yang C B, Ni H J, Su W H, et al. Effects of management measures on organic carbon, nitrogen and chemical structure of different soil fractions in *Phyllostachys edulis* plantations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 25-34.
- [28] 赵隽宇, 黄小芮, 石媛媛, 等. 南亚热带多代连栽桉树人工林根际土壤 FTIR 特征分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 688-694.
- Zhao J Y, Huang X R, Shi Y Y, et al. FTIR characteristics of rhizosphere soil of multi-generation continuous *Eucalyptus* plantation in south subtropical region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(4): 688-694.
- [29] 高欣, 赵雪淞, 赵凤艳, 等. 有机培肥对连作花生土壤肥力及活性有机碳库的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(1): 67-76.
- Gao X, Zhao X S, Zhao F Y, et al. Effect of organic fertilizer on soil fertility and active organic carbon pool in monocultured peanut fields [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1): 67-76.

(上接第 243 页)

- [26] Song Y, Haney C H. Drought dampens microbiome development [J]. Nature Plants, 2021, 7(8): 994-995.
- [27] 苏正安, 张建辉. 耕作侵蚀及其对土壤肥力和作物产量的影响研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 272-278.
- Su Z A, Zhang J H. Research progress in tillage erosion and its impacts on soil fertility and crop production [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(1): 272-278.
- [28] 聂小军, 徐小涛. 耕作侵蚀对农田坡地景观影响的研究进展[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 254-260.
- Nie X J, Xu X T. Research progress in tillage erosion effects on agricultural sloping landscape [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 254-260.
- [29] De Alba S, Lindstrom M, Schumacher T E, et al. Soil landscape evolution due to soil redistribution by tillage: a new conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes [J]. Catena, 2004, 58(1): 77-100.
- [30] 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 157-164.
- Fan H Z, Zhang J H, Wang Y, et al. Tillage erosion impacts on soil aggregate associated carbon in mountainous region slope farmland of northern Sichuan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 157-164.

(上接第 254 页)

- [22] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应: 以贵州省为例[J]. 中国土地科学, 2021, 35(11): 101-111.
- Chen M J, Wang Q R, Bai Z K, et al. Transition of “production-living-ecological” space and its carbon storage effect under the vision of carbon neutralization: a case study of Guizhou Province [J]. China Land Science, 2021, 35(11): 101-111.
- [23] Hamel P, Chaplin-Kramer R, Sim S, et al. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA [J]. Science of the Total Environment, 2015, 524: 166-177.
- [24] Stephen, Polasky, Kate, et al. Valuing wetland ecosystem services: a case study of Delaware [J]. National Wetlands Newsletter, 2012, 34(5): 16-20.
- [25] Houghton R A, Hackler J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia [J]. Global Change Biology, 1999, 5(4): 481-492.
- [26] Xu J R, Renaud F G, Barrett B. Modelling land system evolution and dynamics of terrestrial carbon stocks in the Luanhe River Basin, China: a scenario analysis of trade-offs and synergies between sustainable development goals [J]. Sustainability Science, 2022, 17(4): 1323-1345.
- [27] Han D, Qiao R L, Ma X M. Optimization of land-use structure based on the trade-off between carbon emission targets and economic development in Shenzhen, China [J]. Sustainability, 2019, 11(1): 11.
- [28] He B, Miao L J, Cui X F, et al. Carbon sequestration from China's afforestation projects [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 5491-5499.