

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.021.

王斐, 马锐豪, 夏开, 等. 森林转换对土壤活性有机碳组分的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 233-240.
WANG Fei, MA Ruihao, XIA Kai, et al. Response of Soil Labile Organic Carbon Fractions to Forest Conversions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 233-240.

森林转换对土壤活性有机碳组分的影响

王 斐, 马锐豪, 夏 开, 温正宇, 徐小牛

(安徽农业大学 林学与园林学院, 合肥 230036)

摘 要:为了研究林型转换对土壤活性有机碳组分的影响,在安徽皖南地区蔡家桥林场选取了马尾松次生林、湿地松人工林以及杉木人工林 3 种森林类型,分别采集了 0—10, 10—30, 30—50 cm 的土壤,测定了土壤有机碳(SOC)、颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(EOC)、微生物生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)以及土壤理化指标,分析了林型转换后土壤活性有机碳组分变化特征及其与土壤理化因子间的相关关系。结果表明:(1) 马尾松次生林转换成湿地松人工林和杉木人工林后主要对 0—10 cm 土壤活性有机碳组分产生影响,其中土壤 SOC, POC, EOC 含量均在林型转换后出现下降, DOC 含量上升,而 MBC 在林型转换前后无显著差异。(2) 林型转换后各土层 POC/SOC 均出现下降, DOC 和 EOC 占 SOC 比例总体呈升高趋势, MBC/SOC 则未表现出明显规律。(3) 土壤有机碳与活性碳组分以及 TN, EC, NH_4^+-N , NO_3^--N 均呈极显著正相关,各活性碳组分之间也存在极显著正相关关系($p<0.01$)。综上,马尾松次生林转换成湿地松人工林和杉木人工林主要导致了表层土壤有机碳的流失及其稳定性下降,影响了表层土壤活性有机碳含量,对深层土壤有机碳及其活性组分影响较小,这可能是由于不同林型、微生物活性和管理干扰等多种因素的综合作用。

关键词:森林转换; 林分类型; 土壤有机碳; 活性有机碳

中图分类号: S714.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2023)01-0233-08

Response of Soil Labile Organic Carbon Fractions to Forest Conversions

WANG Fei, MA Ruihao, XIA Kai, WEN Zhengyu, XU Xiaoniu

(School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: In order to study the effect of forest type conversion on soil active organic carbon components, three forest types, *Pinus massoniana* secondary forest, *P. ellimattii* plantation and *Cunninghamia lanceolata* plantation, were selected in Caijiaqiao Forest Farm in southern Anhui Province. The samples were collected from soil depths of 0—10 cm, 10—30 cm and 30—50 cm, respectively. The soil organic carbon (SOC), particulate organic carbon (POC), easily-oxidized organic carbon (EOC), microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC) and physicochemical properties were determined. The change characteristics of soil organic carbon components after forest type transformation and their relationship with soil physico-chemical factors were analyzed. The results showed that: (1) the conversion of *P. massonensis* secondary forest to *P. elliotii* plantation and *C. lanceolata* plantation mainly affected the soil active organic carbon components in 0—10 cm soil layer; the SOC, POC and EOC contents in soil decreased after the conversion, and DOC content increased, while MBC had no significant differences before and after the conversion; (2) after forest type conversion, the proportion of POC to SOC in each soil layer decreased, while the proportions of DOC and EOC to SOC increased; the proportion of MBC to SOC did not show obvious

regularity; (3) there were significant positive correlations between SOC and active carbon components, as well as TN, EC, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and there were also extremely significant positive correlations among the labile organic carbon fractions. From what has been discussed above, the conversion of *P. massoniana* secondary forest to *P. elliotii* plantation and *C. lanceolata* plantation mainly resulted in SOC loss and its stability decrease in surface soil layer, had little effect on SOC and its active components in the deep soil layer due to the comprehensive effects of such factors as different forest types, microbial activities and management interferences.

Keywords: forest conversion; stand type; soil organic carbon; labile organic carbon

土壤是陆地生态系统中最重要、最重要的长期有机碳库,分别是植被和大气碳库的4.5倍和3.1倍^[1-2]。因此,关注土壤有机碳库的动态变化对深入研究全球碳循环十分重要^[3]。土壤有机碳(SOC)储量是碳通过有机质输入持续进入土壤和通过分解矿化、可溶性有机碳淋失和侵蚀之间的动态平衡的结果^[4]。根据土壤碳的周转率,土壤有机碳可分为活性有机碳、缓慢有机碳和顽固性有机碳,其组成、动态及作用一直是国际研究的热点问题^[5]。活性有机碳包括颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(EOC)、微生物生物量碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC)等组分,被认为是生物可利用的碳源,对有机碳动态和养分循环至关重要,并且比总有机碳对环境变化的响应更快^[6]。因此,准确量化土壤活性有机碳组分对深入理解土壤碳循环具有深刻意义^[7]。

森林生态系统是重要的土壤有机碳库,容易受到气候、土壤类型、森林管理措施以及植被类型的复杂交互作用的影响^[8]。森林转换是一种森林管理方法,通常容易导致土壤碳库受到强烈干扰,造成严重养分和碳库损失^[9]。20世纪末,为满足日益增长的木材需求,我国热带和亚热带地区的大片天然林都被采伐而转换成了人工林。然而,大规模森林转换会对土壤碳的周转产生影响,其容易受到生物因素(如植被类型、土壤微生物群落结构和组成、林龄和酶活性等)以及非生物因素(如温度、降雨量、土壤水分、土壤性质、基质可用性等)的共同影响^[10]。因此,森林转换对土壤有机碳库的影响存在诸多不确定性。例如,Chen等^[11]的研究表明,天然常绿阔叶林转换为杉木人工林后,转换初期土壤碳储量出现显著下降,而随着转换时间的增加碳储量逐渐恢复。Yang^[12]发现从天然混交林转变为人工林40 a后,人工林中的土壤有机碳(包括活性有机碳)含量低于天然林。Hizal等^[13]报告指出,从天然阔叶林转变为纯针叶林大约30 a后,与人工林相比,天然林的有机质和全氮含量较高。与此相反的是,Haghdoost等^[14]在伊朗进行的退化天然林转化为人工林的研究得出,人工林的SOC, TN有所提高。

目前,关于森林转换的研究主要集中在土壤碳库恢复,针对更能快速反映土壤碳库变化的活性碳组分的研究相对较少。同时,森林转换林分选择大多为天然阔叶林转换成人工林而对针叶次生林转换成人工纯林后土壤活性有机碳组分的研究相对较少。马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)以及湿地松(*P. elliotii*)都是我国重要的造林树种,确定其森林转换后土壤活性有机碳组分变化,有助于优化经营措施,解决人工林土壤有机碳库与木材生产量之间的权衡问题。因此,本研究选择安徽旌德县蔡家桥林场内马尾松次生林及其转换后的湿地松人工林和杉木人工林作为研究对象,通过研究SOC, POC, EOC, MBC以及DOC对林型转换的响应及其与土壤理化性质的相关关系,以揭示林型转换对土壤活性有机碳组分的影响及其主导因素,从而为该地区土壤碳循环研究和森林可持续经营提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 样地基本概况

试验地设在安徽省旌德县蔡家桥国有林场(118°20' E, 30°20' N),为皖南黄山山脉中、低山区,平均海拔450 m。亚热带季风气候,年平均温度16℃,年平均降水量1 522 mm。其土壤为山地红黄壤。该区域主要树种为马尾松、湿地松、杉木、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、檫木(*Sassafras tzumu*)、化香(*Platycarya strobilacea*)、枫香(*Liquidambar formosana*),林下植被以槲木(*Loropetalum chinense*)、蕨类(*Pteridophyta*)为主。

1.2 样品采集方法

2020年8月进行土壤样品采集。该地区的存在大片马尾松次生林,十几年前采伐部分次生林后通过种植速生丰产的用材树种如杉木、湿地松等,实现了马尾松次生林向人工林的转换。选择3种森林类型设置样地进行调查,其中杉木、湿地松人工林是在砍伐原有的马尾松次生林后建立的,具有相同的土地利用历史。每种森林类型设置3块20 m×20 m的样地,一共建立9块样地。在移除枯枝落叶层

后,每个样地内按 S 型多点混合取样法取样,用土钻按 0—10 cm,10—30 cm 和 30—50 cm 分层取样,共计 81 个混合土样,带回实验室进行分析。样地基本情况见表 1。

表 1 试验地概况

林分类型	林龄/ a	坡度/ (°)	林分密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m
马尾松次生林(PM-SF)	39	35.73±0.59	948.15±383.91	28.26±8.05	15.85±3.95
湿地松人工林(PE-P)	11	25.60±5.45	2103.70±397.31	11.71±3.12	9.93±3.28
杉木人工林(CL-P)	10	26.43±9.13	4044.44±235.18	15.06±1.97	11.41±1.49

1.3 土壤理化指标测定

土壤含水率(SWC):取鲜土在 105℃烘箱中烘至恒重后根据含水率公式计算;土壤电导率(EC)和 pH 值采用 Extech II 型电导仪和 pH 计测定;铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N):称取鲜土 30 g 加入 50 ml 浓度为 1 mol/L 的 KCl 溶液震荡过滤后用连续流动分析仪(FOSS FIA Star5000)测定;有机碳(SOC)和全氮(TN)用元素分析仪(EA3000, Vector, Italy)测定;易氧化有机碳(EOC)采用 KMnO₄ 氧化法^[15]测定;颗粒有机碳(POC)采用六偏磷酸钠法^[16]测定;可溶性有机碳(DOC)含量采用 K₂SO₄ 浸提-Multi C/N 3100 分析仪(Jena Analytik, Germany)测定;微生物生物量碳(MBC)及微生物生物量氮(MBN)含量采用氯仿熏蒸法^[17]测定。

1.4 数据处理与分析

在对数据进行正态性检验后,采用方差分析和 LSD 法对不同林型和土层土壤有机碳及其活性组分进行分析;利用 Pearson 线性相关评估土壤活性有机碳组分与土壤理化因子的关系。图表中数据均为平均值±标准误,采用 R.3.6.1 进行数据分析,运用 Origin 2019b 绘图。

2 结果与分析

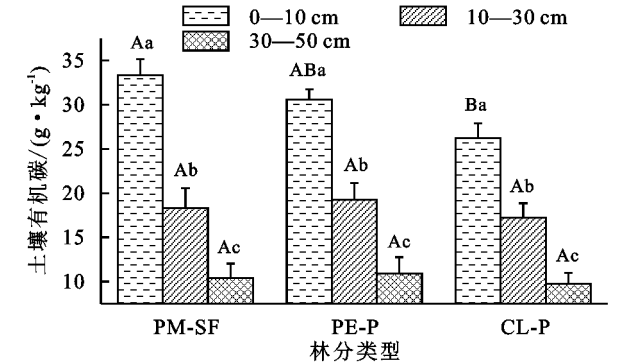
2.1 林型转换后土壤有机碳含量变化特征

由图 1 可知,土壤 SOC 含量在 3 种森林类型中均随着土层的加深而出现显著下降($p<0.05$)。此外,马尾松天然次生林转换为湿地松人工林和杉木人工林后,0—10 cm 土层 SOC 含量分别下降了 8.3%和 21.4%($p<0.05$),而马尾松次生林转换成湿地松人工林和杉木人工林后 10—50 cm 土层土壤 SOC 含量均无显著差异。由表 2 可知,森林类型和土层均对 SOC 含量产生显著影响($p<0.05$)。

2.2 林型转换后土壤活性有机碳组分含量及其分配比例

由图 2 可知,马尾松次生林转换成湿地松人工林和杉木人工林后,0—10 cm 土层土壤 EOC 含量分别下降了 5.3%和 22%($p<0.05$),POC 含量分别下降

了 52.3%($p<0.05$)和 41.8%($p<0.05$),DOC 含量呈现上升趋势,分别上升了 16.19%和 25.5%($p<0.05$),而 MBC 含量则无显著差异。林型转换对 10—50 cm 土层活性碳组分含量并未产生显著影响。各活性碳组分含量均随着土层加深而减少。方差分析结果表明(表 2),林型和土层均对 4 种活性碳组分存在极显著($p<0.01$)或显著影响($p<0.05$),而森林类型和土层深度的交互作用只对 DOC 含量产生显著影响($p<0.05$)。



注:不同大小写字母分别表示森林中同一土壤层之间、相同森林中的土层深度之间的显著差异($p<0.05$)。下同。

图 1 不同森林类型土壤有机碳的平均含量

表 2 森林类型和土层对土壤有机碳组分含量及其比例影响的方差检验结果

影响因子	森林类型		土层		森林类型×土层	
	F	p	F	p	F	p
SOC	3.916	0.024	98.607	<0.001	1.187	0.324
EOC	6.601	0.002	96.613	<0.001	1.375	0.252
POC	5.574	0.006	27.691	<0.001	3.321	0.015
DOC	6.146	0.004	42.836	<0.001	1.258	0.295
MBC	4.508	0.015	58.378	<0.001	1.938	0.113
EOC/SOC	2.421	0.096	0.304	0.739	0.450	0.772
POC/SOC	4.541	0.014	2.321	0.106	1.484	0.217
DOC/SOC	3.36	0.041	8.936	<0.001	1.03	0.398
MBC/SOC	2.086	0.132	1.23	0.299	2.809	0.032

由表 3 可知,3 种林分类型中土壤 POC 占 SOC 比例最大,达到了 8.61%~16.46%,其次是 EOC,占比为 4.78%~5.97%,而 MBC 和 DOC 含量占比相对较低。马尾松次生林转换成两种人工林后,不同土层 POC/SOC 均表现出下降趋势,DOC 和 EOC 占 SOC

的比例则表现出升高趋势, MBC/SOC 未表现出一致的规律。此外, 3 种林分类型中只有土壤 DOC/SOC 随土层的加深而升高, 其他活性碳组分占总有机碳比例在不同土层中呈现不规律分布。由表 2 可知, 森林

类型对土壤 POC 和 DOC 占 SOC 比例存在显著影响 ($p<0.05$), 土层对 DOC/SOC 存在极显著影响 ($p<0.01$), 林型和土层的交互作用只对 MBC/SOC 存在显著影响 ($p<0.05$)。

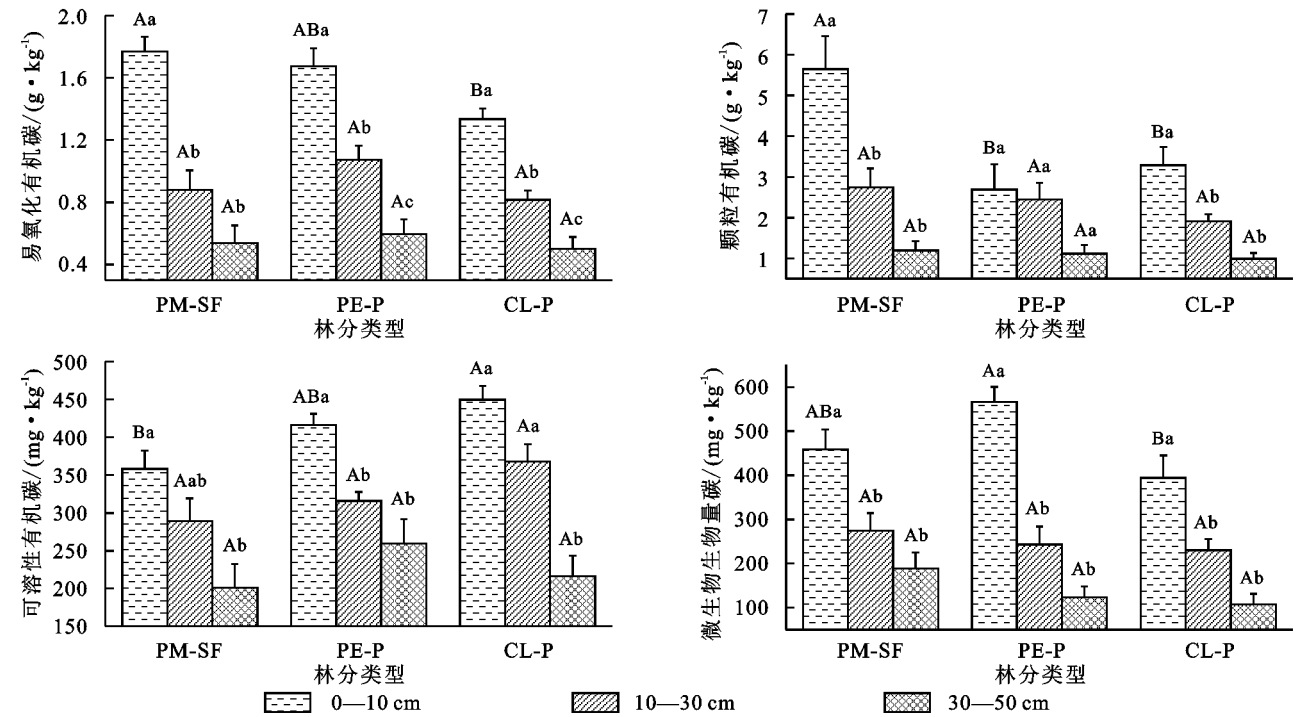


图 2 不同森林类型土壤活性有机碳组分的平均含量

表 3 森林土壤剖面中活性有机碳占土壤总有机碳的比例

森林类型	土层/cm	POC/SOC	EOC/SOC	DOC/SOC	MBC/SOC
马尾松次生林 PM-SF	0—10	16.46±1.63Aa	5.31±0.10Aa	1.09±0.08Bb	1.41±0.16Aa
	10—30	14.99±1.73Aa	4.78±0.18Aa	1.63±0.16Aab	1.49±0.17Aa
	30—50	11.57±1.24Aa	4.97±0.33Aa	1.98±0.28Aa	1.85±0.31Aa
湿地松人工林 PE-P	0—10	8.61±1.88Ba	5.49±0.36Aa	1.38±0.08Bb	1.86±0.12Aa
	10—30	13.03±2.16Aa	5.82±0.60Aa	1.77±0.19Aab	1.31±0.22Aa
	30—50	10.28±1.31Aa	5.86±1.07Aa	2.92±0.89Aa	1.22±0.24ABa
杉木人工林 CL-P	0—10	12.35±1.19ABa	5.38±0.26Aa	1.76±0.11Aa	1.50±0.15Aa
	10—30	11.81±1.54Aa	4.83±0.18Aa	2.27±0.22Aa	1.36±0.11Aa
	30—50	10.22±0.72Aa	5.18±0.37Aa	2.37±0.29Aa	1.03±0.15Ba

2.3 林型转换后土壤活性有机碳组分与理化因子的相关性分析

由表 4 可知, 土壤有机碳与活性碳组分以及各活性碳组分之间均呈极显著正相关关系 ($p<0.01$)。土壤有机碳、活性碳组分与 TN, EC, NH_4^+-N , NO_3^--N , MBN 均存在极显著正相关关系 ($p<0.01$), 土壤 SWC 与 DOC 存在极显著相关关系 ($p<0.01$), 土壤 pH 与 POC 存在显著负相关关系 ($p<0.05$)。

3 讨论

3.1 林型转换对土壤有机碳的影响

土壤有机碳含量是有机物质投入速率和有机碳

矿化速率之间的净平衡的结果, 而林型转换会显著影响土壤碳输入和输出之间的平衡, 从而改变土壤有机碳含量^[18]。胡雪寒等^[19]关于林型转换的研究结果表明, 天然林转换成杉木人工林后土壤有机碳含量下降 24.1%。本研究结果表明, 马尾松次生林转换为湿地松人工林和杉木人工林后 0—10 cm 土壤有机碳含量分别下降了 8.3% 和 21.4%, 方差分析结果表明林型是影响土壤有机碳含量变化的重要驱动因素。林型作为一个关键的生物因子, 通过改变凋落物和根系物质的产量、质量和分解速率、微生物群落和土壤微环境等因素来影响森林土壤有机碳含量。此外, 林龄和降雨量分配也可能是导致林型转换后土壤有机碳

含量下降的原因,Guo 等^[20]关于林型转换的综述表明当转换后人工林林龄小于 40 时,土壤碳储量会减少约 20%。王一佩等^[21]的研究表明,土壤有机碳与林龄呈正相关关系,本研究中各林型林龄表现为马尾松次生林>湿地松人工林>杉木人工林,这与土壤有机碳含量趋势相一致。这可能与森林凋落物积累与分解、根系分泌物的累积有关。研究表明,当森林所属地区年平均降雨量>1 500 mm 时,次生林转为人工林时往往会导致土壤有机碳的损失^[20,22]。降雨导致土壤有机碳流失的主要途径来自两个过程:林型转换初期人工幼林未郁闭降雨会导致坡面形成径流机械去除土壤有机碳以及强降雨冲击的侵蚀力造成的土壤大团聚体破裂,引起原本被团聚体保护的有机碳被微生物分解利用,从而导致土壤有机碳的损失。Mayer 等^[23]研究表明,森林转换导致土壤碳平均损失 7%,流失量主要集中在表层土壤,深层土壤有机碳含量受影响较小,这与本研究结果相一致。

表 4 森林土壤碳组分与理化因子间相关性

参数	SOC	POC	EOC	DOC	MBC
TN	0.940**	0.489**	0.831**	0.465**	0.508**
SWC	0.011	0.003	0.003	0.109**	0.025
pH	-0.004	-0.037*	-0.002	-0.002	-0.001
EC	0.361**	0.443**	0.314**	0.094**	0.199**
NH ₄ ⁺ -N	0.466**	0.270**	0.529**	0.270**	0.473**
NO ₃ ⁻ -N	0.324**	0.237**	0.290**	0.145**	0.165**
MBN	0.476**	0.162**	0.613**	0.540**	0.727**
MBC	0.646**	0.294**	0.631**	0.517**	1
DOC	0.420**	0.155**	0.455**	1	
EOC	0.891**	0.479**	1		
POC	0.554**	1			

注:*表示 $p<0.05$,**表示 $p<0.01$ 。

3.2 林型转换对土壤有活性碳的影响

与森林土壤有机碳相比,周转时间较短的活性有机碳通常更能够敏感地响应林型转换的变化^[26]。然而,不同活性碳组分的大小和特征因森林转换变化的方向和所采用的分级方法而异,所测得的活性碳组分在周转时间、化学成分和功能方面是不同的^[27]。因此,它们对短期森林转换的反应可能不同。例如,在亚热带天然林转换成板栗人工林后活性有机碳组分含量显著减少^[18];在马来西亚,将森林转化为油棕榈人工林后,表土活性有机碳含量增加了 18%^[28]。本研究结果表明,马尾松次生林转换成湿地松和杉木人工林后 0—10 cm 土壤颗粒有机碳和易氧化有机碳含量出现下降,可溶性有机碳含量升高,而微生物生物量碳在林

次生林转换人工林后 10—50 cm 土壤有机碳无显著差异,这可能是由于深层土壤有机碳相对稳定,不同林型产生的凋落物分解输入土壤有机碳只对表层土壤产生较大影响,无法影响深层土壤有关。总体而言,马尾松次生林转换成湿地松和杉木人工林后,均导致了土壤有机碳损失,说明次生林更有利于该地区土壤碳库的积累。

此外,从平衡土壤有机碳库与木材生产量的角度出发,相比较杉木人工林,湿地松人工林在可能是该地区林型转换树种更好的选择。此外,本研究结果表明 3 种森林类型的土壤有机碳含量均随着土层加深出现而显著下降,这与殷有等^[24]的研究相同。这是因为植物凋落物和根系主要集中在表层,并且表层土壤微生物活性高,分解能力强,从而增加表层土壤有机碳含量。而底层土壤有机碳主要来源于根系分泌物、可溶性有机碳淋失、破碎和颗粒有机碳运移,所产生的碳输入有限^[25]。

型转换后无显著差异。各活性有机碳组分在林型转换后表现为不一致的趋势,这与 Wang 等^[29]的研究结果相似。森林转换后土壤活性碳组分的不同格局表明,土壤活性碳组分对森林转化具有树种特异性的响应。因此,在进行大规模森林转换时树种的选择对于该地区土壤碳排放与固存而言十分重要。

林型转换后 POC 与 EOC 含量在土壤表层出现下降,这与前人的研究一致^[30]。这可能是因为天然次生林转换成人工林导致了表层土壤发生强烈扰动,团聚体的破裂可能导致不稳定的 POC 和 EOC 矿化成 CO₂ 而损失。此外,POC 和 EOC 与 SOC 的变化趋势相同,这说明林型转换后土壤有机碳的损失可能是 POC 和 EOC 含量下降的主要因素。土壤中的

DOC 主要是由凋落物渗滤液、根系分泌物和微生物降解产物产生的。本研究结果表明,森林转换后 0—10 cm 土壤 DOC 含量上升,这与 Sheng 等^[18]的研究结果不一致。森林土壤中 DOC 浓度是多种因素共同作用的结果。森林冠层是 DOC 的重要来源^[31],这可能是由于穿透雨将大气中有机物的沉积和源于植物组织中有有机物的淋溶液带入土壤中。林分密度越大林冠层越密,本研究中林分密度表现为杉木人工林>湿地松人工林>马尾松次生林,且试验地区雨水充足,这可能是导致 DOC 含量升高的原因之一。土壤微生物生物量是土壤有机质中的活性成分,与土壤养分循环密切相关^[32]。Dos 等^[33]的研究表明,森林转换后,人工林微生物生物量碳含量出现显著下降,而本研究中微生物生物量碳在马尾松次生林转换成两种人工林后没有产生显著差异,这可能是由于人工林树种的差异造成的。林型转换导致树种发生了改变,不同的树种可能会导致可分解的有机化合物、根密度以及土壤结构等产生差异,这些因素都可能导致林型转换后土壤微生物生物量碳含量出现不一致的结果。此外,有研究表明在湿润季节,热带原生林及其转换的人工林土壤微生物量基本没有差异^[34]。本试验地位于皖南山区,取样时间为夏季,湿润的气候可能是微生物生物量碳含量与其他活性碳组分变化趋势不同的原因。今后可进一步开展森林转换对微生物群落结构影响的相关研究。

土壤活性有机碳组分占总有机碳比例可以用来指示土壤有机碳库的稳定性、有效性和可溶性^[35]。POC/SOC 在一定程度上可以用来表征土壤团聚体稳定性^[36],而团聚体与土壤有机碳保护密切相关。本研究中,林型转换后,两种人工林各土层 POC/SOC 均出现了下降,这说明林型转换降低了土壤团聚体的稳定性,这与林型转换导致土壤有机碳含量下降的结果相一致。DOC/SOC 可以用来表明土壤有机碳的可迁移性,反映了 SOC 的损失水平^[37]。本研究中林型转换后,各土层 DOC/SOC 均出现上升,这与土壤有机碳在林型转换后出现损失的趋势相一致,这可能与林型转换改变了土壤水分有关。EOC/SOC 可以用来表示土壤有机碳的稳定性^[38],本研究中马尾松次生林转换成湿地松和杉木人工林后各土层 EOC/SOC 出现上升,这表明林型转换的土壤有机碳库变得更加活跃,土壤有机碳的稳定性下降,容易造成有机碳的损失。森林土壤中 MBC/SOC 可以用来表示易于代谢的有机碳的比例^[39],本研究中

MBC/SOC 随林型转换未表现出一致的规律,这与林型转换对微生物生物量碳无显著影响的趋势相符,可能是由于不同森林类型产生的凋落物质量、产量和其他碳输入量的不同以及人工林具有很强的特异性有关。活性碳组分占总有机碳比例在次生林转换成人工林后的变化趋势表明,林型转换造成了该地区土壤有机碳库稳定性、有效性下降,不利于该地区土壤库的积累。

3.3 林型转换后土壤活性有机碳组分与理化因子的关系

本研究结果表明,POC,EOC,MBC,DOC 均与 SOC 存在极显著的正相关关系,这得到了朱浩宇^[40]关于活性碳组分相关研究的支持,表明土壤有机碳是影响活性有机碳含量的主要决定因素。因此,森林转换后的活性有机碳含量受总有机碳的控制。活性有机碳组分之间也存在极显著正相关关系,表明其关系密切,作为相似的活性碳库,共同影响土壤有机碳周转^[41]。土壤 SOC 及活性碳组分与 TN 存在极显著正相关关系,这可能是因为土壤中的大部分氮是在有机质中储存的^[42]。同时,丰富的氮素可以提高微生物活性,促进地表凋落物分解,增加有机碳及其活性碳组分含量^[43],这解释了森林生态系统中有机碳组分和全氮含量之间存在显著正相关关系。此外,MBN,NH₄⁺-N,NO₃-N 等活性氮组分与活性有机碳组分也存在极显著正相关关系,这表明氮素有效性也是影响活性碳组分的关键^[44]。土壤电导率可以描述植物生长所需养分的有效性,通常土壤电导率对土壤有机碳的依赖程度很高^[45]。本研究结果表明,土壤电导率与有机碳组分呈极显著正相关关系,因为土壤有机碳含量越高,可为土壤颗粒中的离子提供更大的表面积和交换场所,从而导致更高的电导率^[46]。本研究中 POC 与 pH 之间存在显著负相关关系,这可能是较低的土壤 pH 不利于土壤微生物生存,抑制有机质分解过程中的微生物活性^[47],从而延缓土壤颗粒有机碳的分解、矿化。土壤含水率不仅是影响土壤侵蚀过程、植被生长和恢复的主要因素之一,也是土壤系统中的重要循环物质^[48],本研究中土壤含水率和 DOC 呈极显著正相关关系,表明土壤含水率可能是 DOC 含量的主要驱动因素。总而言之,森林转换对土壤有机碳及其活性组分的影响机制极其复杂,森林转换树种的选择在这过程中十分重要,今后可开展进一步研究来解决土壤有机碳库与木材生产量之间平衡问题。

4 结论

(1) 马尾松次生林转换成人工林后,土壤有机碳的流失主要发生在土壤 0—10 cm,这表明表层土壤对森林转换更加敏感。

(2) 3 种林分类型中土壤有机碳与活性碳组分均呈极显著正相关关系,说明周转时间较短的活性有机碳可以作为评估森林转换对土壤有机碳库影响的指标。

(3) 马尾松天然次生林相比于人工林能更好的维持土壤碳库的稳定,增加土壤碳库的积累。

(4) 不同活性有机碳组分对森林转换的不同响应可能是由于不同植被类型、林分密度等复杂的生物与非生物因素造成的,今后可开展进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004,304(5677): 1623-1627.
- [2] Oelkers E H, Cole D R. Carbon dioxide sequestration: A solution to a global problem [J]. *Elements*, 2008,4(5): 305-310.
- [3] Lal R, Smith P, Jungkunst H F, et al. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,73(6):145-152.
- [4] 陈志杰,韩士杰,张军辉.土地利用变化对漳江口红树林土壤有机碳组分的影响[J].*生态学杂志*,2016,35(9): 2379-2385.
- [5] Guan S, An N, Zong N, et al. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,116:224-236.
- [6] Zhao Y G, Liu X F, Wang Z L, et al. Soil organic carbon fractions and sequestration across a 150-yr secondary forest chronosequence on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2015,133:303-308.
- [7] Wang Q, Wang S. Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011,47(3):210-216.
- [8] 王仁杰,蒋焱,王勇,等.南亚热带不同红锥混交林土壤碳库稳定性与碳库管理指数变化[J].*林业科学研究*, 2021,34(2):24-31.
- [9] Hobley E, Baldock J, Hua Q, et al. Land-use contrasts reveal instability of subsoil organic carbon [J]. *Global Change Biology*, 2017,23(2):955-965.
- [10] 李若南,楚海燕,李一清,等.森林转换对不同土层土壤碳氮含量及储量的影响[J].*亚热带资源与环境学报*, 2019,14(1):23-29.
- [11] Chen L C, Wang H, Yu X, et al. Recovery time of soil carbon pools of conversional Chinese fir plantations from broadleaved forests in subtropical regions, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,587:296-304.
- [12] Yang Y, Guo J, Chen G, et al. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China [J]. *Plant and Soil*, 2009,323(1):153-162.
- [13] Hizal A, Gokbulak F, Zengin M, et al. Effect of vegetation change from native broadleaf forest to coniferous plantation on selected soil properties [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013,185(12):10249-10256.
- [14] Haghdoost, Niloufar, Akbarinia, et al. Conversion of Hyrcanian degraded forests to plantations: Effects on soil C and N stocks [J]. *Annals of Biological Research*, 2011,2(5):385-399.
- [15] Blair G, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995,46(7):393-406.
- [16] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992,56(3):777-783.
- [17] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987,19(6):703-707.
- [18] Sheng H, Zhou P, Zhang Y, et al. Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015,88:148-157.
- [19] 胡雪寒,刘娟,姜培坤,等.亚热带森林转换对不同粒径土壤有机碳的影响[J].*土壤学报*,2018,55(6):1485-1493.
- [20] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis [J]. *Global Change Biology*, 2002,8(4):345-360.
- [21] 王一佩,孙美美,程然然,等.黄土高原中西部人工针叶林浅层土壤有机碳积累及影响因素[J].*水土保持研究*,2020,27(3):30-36.
- [22] Polyakov V O, Lal R. Soil organic matter and CO₂ emission as affected by water erosion on field runoff plots [J]. *Geoderma*, 2008,143:216-222.
- [23] Mayer M, Prescott C E, Abaker W E A, et al. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020,466:118127.

- [24] 殷有,刘源跃,井艳丽,等.辽东山区3种典型林型土壤有机碳及其组分含量[J].生态学杂志,2018,37(7):2100-2106.
- [25] Lv H, Liang Z. Dynamics of soil organic carbon and dissolved organic carbon in *Robina pseudoacacia* forests [J]. Journal of Soil Science & Plant Nutrition, 2012,12(4):763-774.
- [26] Laik R, Kumar K, Das D K, et al. Labile soil organic matter pools in a calciorthent after 18 years of afforestation by different plantations [J]. Applied Soil Ecology, 2009,42(2):71-78.
- [27] Eduard Strosser. Methods for determination of labile soil organic matter:An overview [J]. Journal of Agrobiology, 2010,27(2):49-60.
- [28] Nahrawi H, Husni M, Radziah O. Labile carbon and carbon management index in peat planted with various crops [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2012,43(12):1647-1657.
- [29] Wang Q, Xiao F, He T, et al. Responses of labile soil organic carbon and enzyme activity in mineral soils to forest conversion in the subtropics [J]. Annals of Forest Science, 2013,70(6):579-587.
- [30] Xiao Y, Tong F, Liu S, et al. Response of soil labile organic carbon fractions to forest conversions in subtropical China [J]. Tropical Ecology, 2016,57(4):691-699.
- [31] 丘清燕,梁国华,黄德卫,等.森林土壤可溶性有机碳研究进展[J].西南林业大学学报,2013,33(1):86-96.
- [32] 张艳,李勋,宋思梦,等.马尾松与乡土阔叶树种凋落叶混合分解过程中微生物生物量特征[J].生态环境学报,2021,30(4):681-690.
- [33] Dos S U J, De Medeiros E V, Duda G P, et al. Land use changes the soil carbon stocks, microbial biomass and fatty acid methyl ester(FAME)in Brazilian semiarid area [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2018,65(6):755-769.
- [34] Da Silva D K A, De Oliveira Freitas N, De Souza R G, et al. Soil microbial biomass and activity under natural and regenerated forests and conventional sugarcane plantations in Brazil [J]. Geoderma, 2012,189:257-261.
- [35] 韩琳,张玉龙,金烁,等.灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响[J].中国农业科学,2010,43(8):1625-1633.
- [36] 牟凌,张丽,陈子豪,等.四川盆地西缘4种人工林土壤有机碳组分特征[J].甘肃农业大学学报,2020,55(3):121-126,133.
- [37] 陈志杰,韩士杰,张军辉.土地利用变化对漳江口红树林土壤有机碳组分的影响[J].生态学杂志,2016,35(9):2379-2385.
- [38] 翟凯燕,马婷瑶,金雪梅,等.间伐对马尾松人工林土壤活性有机碳的影响[J].生态学杂志,2017,36(3):609-615.
- [39] 郝江勃,乔枫,蔡子良.亚热带常绿阔叶林土壤活性有机碳组分季节动态特征[J].生态环境学报,2019,28(2):245-251.
- [40] 朱浩宇,王子芳,陆畅,等.缙云山5种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征[J].土壤,2021,53(2):354-360.
- [41] 刘雅洁,王亮,樊伟,等.海拔对杉木人工林土壤活性有机碳组分的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2021,49(8):2-12.
- [42] Xie B, Zhang C, Wang G, et al. Global convergence in correlations among soil properties [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(3):108-116.
- [43] 习丹,余泽平,熊勇,等.江西官山常绿阔叶林土壤有机碳组分沿海拔的变化[J].应用生态学报,2020,31(10):3349-3356.
- [44] 龚臣,王旭东,倪幸,等.长期菌渣化肥配施对稻田土壤活性有机碳组分和有效养分的影响[J].浙江农林大学学报,2018,35(2):252-260.
- [45] Fu B, Qi Y B, Chang Q R. Impacts of revegetation management modes on soil properties and vegetation ecological restoration in degraded sandy grassland in farming-pastoral ecotone[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015,8(1):26-34.
- [46] Parfitt R L, Giltrap D J, Whitton J S. Contribution of organic matter and clay minerals to the cation exchange capacity of soils [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1995,26(9/10):1343-1355.
- [47] 郭辉,唐卫平.不同林龄华北落叶松根际与非根际土壤酶和土壤微生物研究[J].生态环境学报,2020,29(11):2163-2170.
- [48] 徐雅洁,郭月峰,姚云峰,等.不同林分配置对土壤水分物理性质的影响[J].四川农业大学学报,2021,39(3):370-377.