湘西北天然林转换对土壤有机碳库活性与酶活性的影响

肖华翠[1]，李 雪[1]，盛 浩[1]，张丽娜[1]，罗飞雪[1]，周 萍[2]

（1.湖南农业大学 资源学院，湖南 长沙 410128；
2.中国科学院 亚热带农业生态研究所，亚热带农业生态过程重点实验室，湖南 长沙 410125）

摘　要：［目的］了解土壤活性有机碳（SOC）组分和酶活性对天然林转换的响应，为预测区域土壤健康演变和环境变迁提供科学依据。［方法］选取本底一致，利用历史清晰的天然常绿阔叶林以及由此转变而来的针叶人工林、果园、坡耕地和水田，应用物理、化学和生物化学分析技术，研究表土活性有机碳组分和酶活性对天然林转换的响应规律与差异。［结果］天然林改为果园、坡耕地和水田后显著降低土壤有机碳、活性有机碳含量和酶活性，降幅分别为 42%～67%，47%～88%和 36%～89%。其中，以易氧化有机碳、微生物生物量碳含量和蔗糖酶活性的敏感性相对高于 SOC 敏感性，敏感地指示土壤有机碳库及活性的降低，易氧化有机碳更适宜推广应用。天然林改为人工林，土壤活性有机碳、酶活性的敏感性一般低于天然林改为果园、坡耕地，相对有利于土壤中活性有机碳库的保存。活性有机碳占总有机碳的比例由天然林改为人工林后显著降低，敏感地指示土壤碳库质量的下降。［结论］天然林转换不仅导致土壤活性有机碳数量大幅减少，有机碳库的质量下降，与之相关的酶活性也降低；土壤有机碳的活性和酶活性的降低，指示天然林转换后土壤生物健康/质量的退化。

关键词：天然林转换；活性有机碳组分；酶活性；土壤健康；湘西北

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2023)05-0411-08　　**中图分类号：**S718.55，S153

文献参数：肖华翠，李雪，盛浩，等.湘西北天然林转换对土壤有机碳库活性与酶活性的影响[J].水土保持通报，2023，43(5)：411-418.DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20231013.001；Xiao Huacui，Li Xue，Sheng Hao，et al. Effects of native forest conversion on soil organic carbon lability and enzyme activity in Northwestern Hunan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2023，43(5)：411-418.

Effects of Native Forest Conversion on Soil Organic Carbon Lability and Enzyme Activity in Northwestern Hunan Province

Xiao Huacui[1]，Li Xue[1]，Sheng Hao[1]，Zhang Lina[1]，Luo Feixue[1]，Zhou Ping[2]

（1.*College of Resources*，*Hunan Agricultural University*，*Changsha*，*Hunan* 410128，*China*；2. *Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region*，*Institute of Subtropical Agriculture*，*Chinese Academy of Sciences*，*Changsha*，*Hunan* 410125，*China*）

Abstract：［Objective］The response of soil labile organic carbon components and enzyme activities to natural forest conversion was analyzed in order to provide a scientific basis for predicting regional soil health evolution and environmental change. ［Methods］A native evergreen broad-leaved forest and a converted conifer plantation，an orchard，a sloping tillage area，and a paddy with similar geographical background and clear land use history were studied. The responses of labile organic carbon fractions and enzyme activities in topsoil to native forest conversion were investigated using various physical，chemical，and biochemical techniques. ［Results］The native forest conversion to an orchard，a sloping tillage area，and a paddy significantly reduced the soil organic carbon content，labile carbon fraction contents，and enzyme activities by 42%—67%，47%—88%，and 36%—89%，respectively. Notably，the readily oxidizable organic carbon，microbial biomass carbon，and invertase activity experienced the greatest reduction compared with the native forest conversion，sensitively indicating the reduction in soil organic carbon content and its lability. Readily oxidizable organic carbon was，therefore，considered to be a practical index. Reductions in soil labile organic carbon fractions

收稿日期：2022-12-21　　**修回日期：**2023-02-08
资助项目：国家自然科学基金项目“亚热带丘陵区典型农林用地底土有机碳稳定机理研究”（41571234）；2023 年湖南农业大学研究生科研创新项目“热点区土壤微生物多样性及功能对土地利用变化的响应”（2023XC115）；湖南省重点研发计划项目（2023NK2026）
第一作者：肖华翠（1993—），女（汉族），云南省昭通市人，博士生，研究方向为土地转换与土壤健康。Email：xhc9578@stu.hunau.edu.cn。
通信作者：盛浩（1982—），男（汉族），湖南省长沙市人，博士，教授，主要从事土壤资源利用与环境研究。Email：shenghao82@hunau.edu.cn。

and enzyme activities were lower for the conversion of native forest conversion to plantation than for the native forest conversion to orchard and sloping tillage area, showing the preservation capacity of soil labile carbon in the plantation. The ratio of labile organic carbon to total organic carbon in soil was significantly reduced after the native forest conversion to plantation, sensitively reflecting the reduction in soil carbon quality. [Conclusion] Native forest conversion led to substantial reductions in labile organic carbon quantity, carbon quality, and related enzyme activities in soil, suggesting a degradation of soil biological health and a decline in soil quality.

Keywords: native forest conversion; labile organic carbon fractions; enzyme activities; soil health; Northwestern Hunan Province

全球土地利用/覆被变化(LUCC)是土壤质量/健康退化和温室气体排放的主要驱动力之一。联合国粮农组织(FAO)在《全球森林资源评估》报告中指出,1990—2020 年,世界森林面积减少 1.78×10^8 hm^2,主要途径为毁林、原始/自然林地转换为其他土地利用方式(例如,草地、人工林、果园、耕地和裸地)[1]。研究表明,LUCC 通过耦合复杂地形、气候和高强度土地利用活动,导致土壤退化和土地生产力降低,改变生态系统的源/汇功能[2-4]。因此,量化 LUCC 过程产生的土壤生态环境效应,对于准确评估地球表层土地系统的潜在风险和区域可持续土壤健康管理具有重要意义。

在土壤酶的催化作用下,活性有机碳(LOC)为土壤食物网生命活动提供主要底物供应,这一过程与土壤生态系统服务功能(养分循环、水分渗滤、碳吸存和生物多样性维持)关系密切。由于土壤活性有机碳与酶的活性对土地利用转换与管理活动响应敏感,测试成本较低且相对简单,常作为评价土壤有机碳和土壤健康短期变化的"指示器"[5]。目前,基于物理、化学和生物化学技术,分离出一系列的土壤活性有机碳组分,例如:轻组有机碳(LFOC)、颗粒有机碳(POC)、溶解性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC)。有关土壤 LOC 组分对土地转换尤其是天然林转换的响应,已有较多报道[3-4,6]。然而,气候、土壤类型、植被覆盖和耕作管理方式均具有地域性差异。在不同气候带、不同土壤质地类型下,有关土壤 LOC 组分含量与酶活性强度对天然林转换的响应规律,仍有待深入揭示。本课题组最近报道,与花岗岩红壤相比,板岩红壤质地更黏重、团聚体物理保护作用更强,可能更有利于土壤颗粒有机碳的积累[7]。近年有证据显示,土壤微生物相关指标(例如:微生物碳利用效率、微生物来源的碳组分和微生物碳、氮、磷代谢酶)对土壤有机碳库和土壤生物健康变化具有很好指示作用[8-9]。然而,不同土壤 LOC 组分与微生物酶活性的指示作用差异,仍不明确。

因此,本研究选取中亚热带丘陵区小流域内毗邻分布且本底条件基本一致,土地利用史清晰的天然常绿阔叶林,以及由此转变而来的人工林、果园、坡耕地和水田,采集起源于板岩风化物母质的表土,室内分析土壤 LOC 组分、酶活性及其相关性,目的在于:①理解土壤 LOC 组分、酶活性对天然林转换的响应规律;②明确土壤 LOC 组分和酶活性对天然林转换响应的敏感性及其指示作用。以期为区域国土空间合理规划、可持续性的土地利用优化管理和固碳增汇提供参考和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于湘西北永顺县小溪国家级自然保护区(110°06′—110°21′E,28°42′—28°53′N),典型低山、丘陵地貌,海拔 400～800 m;盛行中亚热带湿润季风气候,年均气温 14 ℃,年均降水量 1 360 mm(集中在 5—7 月)。保护区生长大片亚热带低海拔常绿阔叶原始次生林,誉为"中南十三省唯一免遭第四纪冰川侵袭的原始次生林天然资源宝库"。地带性土壤类型主要为板岩风化物发育的泥质红壤(土属),呈酸性,土体厚度一般> 1 m。

在小溪镇的泉溪、田溶和小溪 3 个自然村内,选取 3 个小流域。在小流域同侧,分别选取天然林(对照)以及毗邻由天然林转换而来的针叶人工林、果园、坡耕地和水田为研究对象,样地基本概况见表 1。天然林为当地典型地带性植被——常绿阔叶林,起源可追溯至第四纪,人类活动干扰很少,乔、灌分层,草本稀疏。天然林经砍伐、炼山、整地后,移栽杉木或马尾松人工林幼苗,幼年人工林有轻度管理,包括人工抚育间伐、清除林下草灌。果园植被为柑橘或猕猴桃,坡耕地种植双季玉米,水田种植一季稻。基于坡改梯技术,营建果园、坡耕地和水田。柑橘园定期施用有机肥和化肥(N,P_2O_5,K_2O 配比为 15∶20∶5),有机肥和化肥施用量分别为 8.00×10^8,300 kg/(hm^2·a),猕猴桃园有机肥和化肥的年施用量分别为 4.20×10^5,840 kg/hm^2。玉米地 N,P,K 肥年施用量分别为 135,

26，96 kg/hm²，水田 N，P，K 肥施用量分别为 135，26，96 kg/hm²。果园、坡耕地和稻田采用传统常规管理措施，包括耕作、施肥、除草和旱季灌溉（表 1）。

表 1　样地基本概况

Table 1　General characteristics of sampling plots

所在区域	土地利用方式	海拔/m	坡度/(°)	土地利用史/a	优势植物种
泉溪村	天然林	540	30	>1 000	利川润楠
	人工林	590	20	35	杉木
	果园	770	20	15	柑橘
	坡耕地	460	15	45	玉米
	水田	450	15	65	水稻
田溶村	天然林	600	30	>1 000	利川润楠
	人工林	590	25	30	马尾松
	果园	650	20	12	柑橘
	坡耕地	600	20	30	玉米
	水田	576	15	60	水稻
小溪村	天然林	530	30	>1 000	锥属
	人工林	530	30	40	杉木
	果园	720	20	10	猕猴桃
	坡耕地	530	20	50	玉米
	水田	500	20	50	水稻

1.2　土壤样品野外采集与室内分析

2021 夏季，在各土地利用方式内，随机布设 3 块样地（25 m×25 m），各样地内设置 10～15 个采样点。采用自制土钻（内径 2.8 cm），钻取 0—20 cm 表土，挑去植物残体、石块等土壤异物，将钻取土芯混匀为 1 个混合样。新鲜土壤样品带回室内，分成两部分。一部分鲜土样自然风干，压碎、研磨后，分别过 2.00，0.25，0.15 mm 的尼龙筛，用于土壤理化指标的测定；另一部分鲜土样置于 4 ℃保鲜盒保存，过 2.00 mm 的尼龙筛，混匀后于冰箱 4 ℃保存，用于土壤中酶活性和 MBC 的测定。试验地表土基本理化性质见表 2。

土壤指标测定方法为：SOC 采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法；pH 值采用水浸提（水土体积比 2.5∶1），电位法；TN 采用凯式定氮法；TP 采用酸溶—钼锑钪比色法；有效磷（Olsen-P）采用碳酸氢钠浸提—钼锑钪比色法；NH_4^+-N 采用 KCl 浸提，流动分析仪测定；DOC 和 DON 用去离子水浸提，TOC 仪法[10]；LFOC 采用密度为 1.7 g/cm³ 的 NaI 重液浸提，烧失法[11]；MBC 采用氯仿熏蒸法，TOC 仪法；POC 采用湿筛法提取，重铬酸钾外加热容量法[12]；ROC 采用 333 mmol/L $KMnO_4$ 溶液浸提，565 nm 波长比色法[13]。蔗糖酶活性采用 3，5-二硝基水杨酸比色法；脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法；荧光素二乙酸酯（FDA）水解酶活性采用荧光比色法；过氧化氢酶活性采用荧光比色法[14]。

表 2　试验地 0—20 cm 表土基本理化性质

Table 2　Basic physicochemical properties of 0－20 cm topsoil in experimental sites

指标	SOC/(g·kg⁻¹)	pH 值	TN/(g·kg⁻¹)	TP/(g·kg⁻¹)	DON/(mg·kg⁻¹)	Olsen-P/(mg·kg⁻¹)	NH_4^+-N/(mg·kg⁻¹)
天然林	55±7[a]	4.7±0.4[b]	4.5±0.8[a]	0.9±0.5[a]	123±57[a]	9.2±2.1[ab]	48±15[a]
人工林	52±4[a]	4.8±0.3[b]	3.4±1.2[a]	0.4±0.3[b]	83±28[a]	8.4±2.6[b]	44±24[a]
果园	18±7[c]	4.7±0.4[ab]	1.4±0.4[b]	0.3±0.1[c]	31±15[b]	7.7±4.1[b]	15±3[b]
坡耕地	19±6[c]	5.4±0.3[a]	2.3±0.5[b]	0.5±0.1[b]	40±20[b]	12.9±1.3[a]	21±6[b]
水田	32±6[b]	5.5±0.2[a]	2.8±0.3[ab]	0.6±0.1[a]	52±13[b]	13.7±4.5[a]	23±5[b]

注：①SOC 为土壤有机碳；TN 为总氮；TP 为总磷；DON 为可溶性有机氮；Olsen-P 为有效磷；NH_4^+－N 为铵态氮；②不同小写字母表示不同处理间差异显著（$p<0.05$），下同。

1.3　数据分析

基于 Microsoft Excel 和 SPSS 软件平台，计算土壤指标的描述统计量（平均值和标准差）。应用单因素方差分析，对天然林、人工林、果园、坡耕地和水田的土壤指标进行均值比较，显著性水平设为 0.05。利用 Origin 2019 软件作图，图表中数据为平均值±标准差。

土壤有机碳及组分、酶活性对天然林转换响应的敏感性指数（SI）计算公式为[3]：

$$SI=\frac{Q_2-Q_1}{Q_1}\times 100\% \quad (1)$$

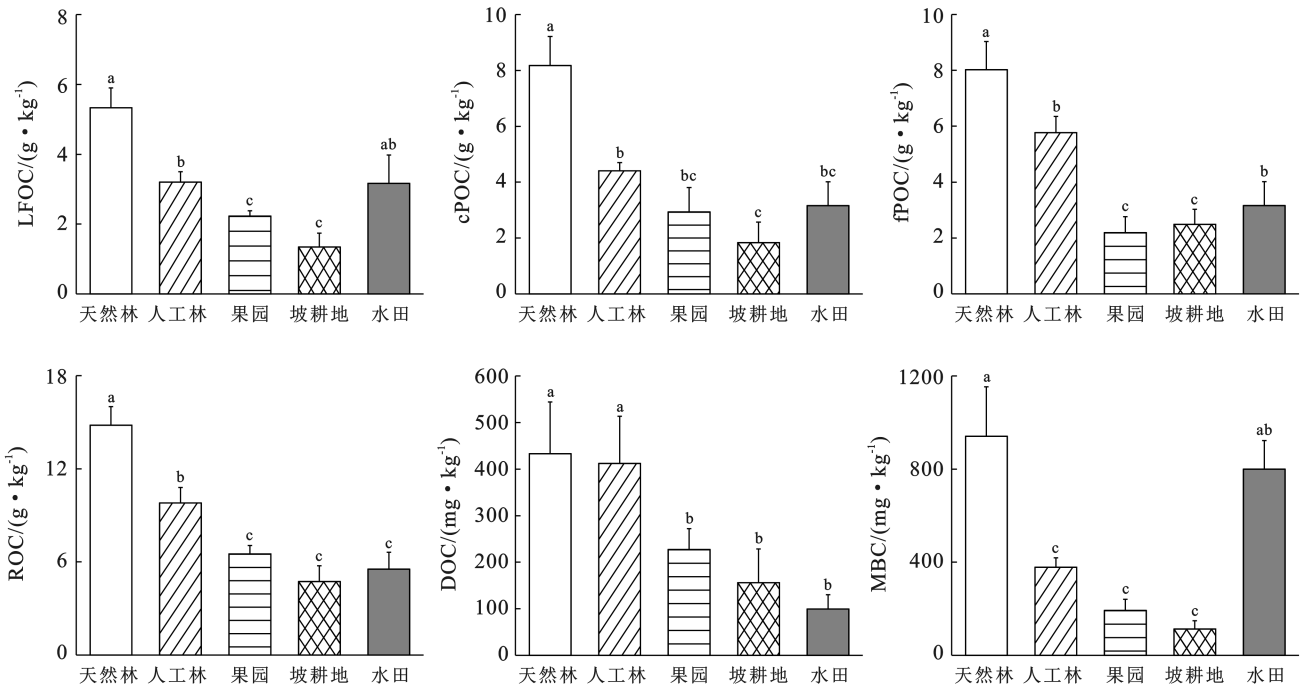
式中：Q_1 为对照（天然林）土壤指标；Q_2 为其他土地利用方式土壤指标。

2　结果与分析

2.1　土壤有机碳及活性组分

天然林转换显著降低土壤有机碳及其活性组分的含量（表 2 和图 1）。天然林改为果园、坡耕地，土壤有机碳及其活性组分含量的降幅一般高于天然林改为人工林。天然林改为果园、坡耕地和水田，土壤 SOC 含量分别显著降低 67%，65%和 42%（$p<0.05$）。与天然林相比，人工林、果园和坡耕地土壤 LFOC 含

量分别显著降低 40%，58%和 75%。天然林改为人工林、果园、坡耕地和水田，也显著降低土壤 cPOC，fPOC 和 ROC 含量，以 cPOC 含量的降幅最高(28%～78%)。与天然林相比，果园、坡耕地和水田土壤 DOC 含量分别降低 47%，69%和 77%，人工林、果园和坡耕地土壤 MBC 含量分别降低 60%，80%和 88%($p<0.05$)。天然林与水田土壤 LFOC 和 MBC 含量均无显著差异。



注：cPOC 为粗颗粒有机碳(>250 μm)；fPOC 为细颗粒有机碳(250～53 μm)；LFOC 为轻组有机碳；POC 为颗粒有机碳；MBC 为微生物生物量碳。下同。

图 1 天然林转换对土壤活性有机碳组分的影响

Fig.1 Effects of native forest conversion on soil labile organic C fractions

土壤 LOC/SOC 介于 0.3%～28%(表 3)。与天然林相比，人工林土壤 LFOC/SOC，cPOC/SOC 和 ROC/SOC 分别显著降低 40%，40%和 30%，其降幅均高于 SOC 降幅(5%)；水田土壤 ROC/SOC 和 DOC/SOC 分别显著降低 41%和 63%，DOC/SOC 降幅高于 SOC 降幅(42%)。因此，LFOC/SOC，ROC/SOC 和 cPOC/SOC 敏感地指示天然林转换为人工林土壤碳库质量变化，而 DOC/SOC 则敏感地指示天然林转换为水田土壤碳库质量变化。

2.2 土壤酶活性

天然林转换显著影响土壤蔗糖酶、脲酶和 FDA 水解酶活性，但对 H_2O_2 酶活性无显著影响(图 2)。与天然林相比，人工林、果园、坡耕地和水田土壤蔗糖酶活性分别降低 39%，55%，51%和 89%；土壤脲酶活性分别降低 19%，51%，67%和 64%；土壤 FDA 水解酶活性分别降低 31%，58%，36%和 61%($p<0.05$)。

2.3 土壤活性有机碳组分、酶活性与土壤理化性质的相关性

土壤 LFOC，cPOC，fPOC 和 ROC 含量与蔗糖酶、脲酶、FDA 水解酶和 H_2O_2 酶活性呈显著正相关。土壤 DOC 含量仅与脲酶活性呈显著正相关。土壤 MBC 含量与脲酶和过氧化氢酶活性呈显著正相关($p<0.05$，表 4)。

表 3 不同土地利用方式土壤活性有机碳组分占土壤总有机碳的比例

Table 3 Ratio of labile soil organic carbon fractions to soil organic carbon in various land uses %

项 目	LFOC/SOC	cPOC/SOC	fPOC/SOC	ROC/SOC	DOC/SOC	MBC/SOC
天然林	10 ± 2^{a}	15 ± 1^{a}	15 ± 3^{a}	27 ± 4^{a}	0.8 ± 0.5^{ab}	2.2 ± 1.6^{ab}
人工林	6 ± 1^{b}	9 ± 1^{b}	11 ± 2^{a}	19 ± 3^{b}	0.8 ± 0.4^{ab}	1.8 ± 0.3^{b}
果 园	12 ± 1^{a}	15.1 ± 4.2^{a}	11 ± 3^{a}	23 ± 2^{a}	1.4 ± 0.9^{a}	1.1 ± 0.2^{b}
坡耕地	8 ± 3^{ab}	11 ± 4^{ab}	11 ± 6^{a}	28 ± 5^{a}	1.0 ± 0.6^{ab}	0.7 ± 0.3^{b}
水 田	10 ± 3^{a}	10 ± 3^{ab}	15 ± 3^{a}	16 ± 3^{b}	0.3 ± 0.1^{b}	2.3 ± 0.3^{a}

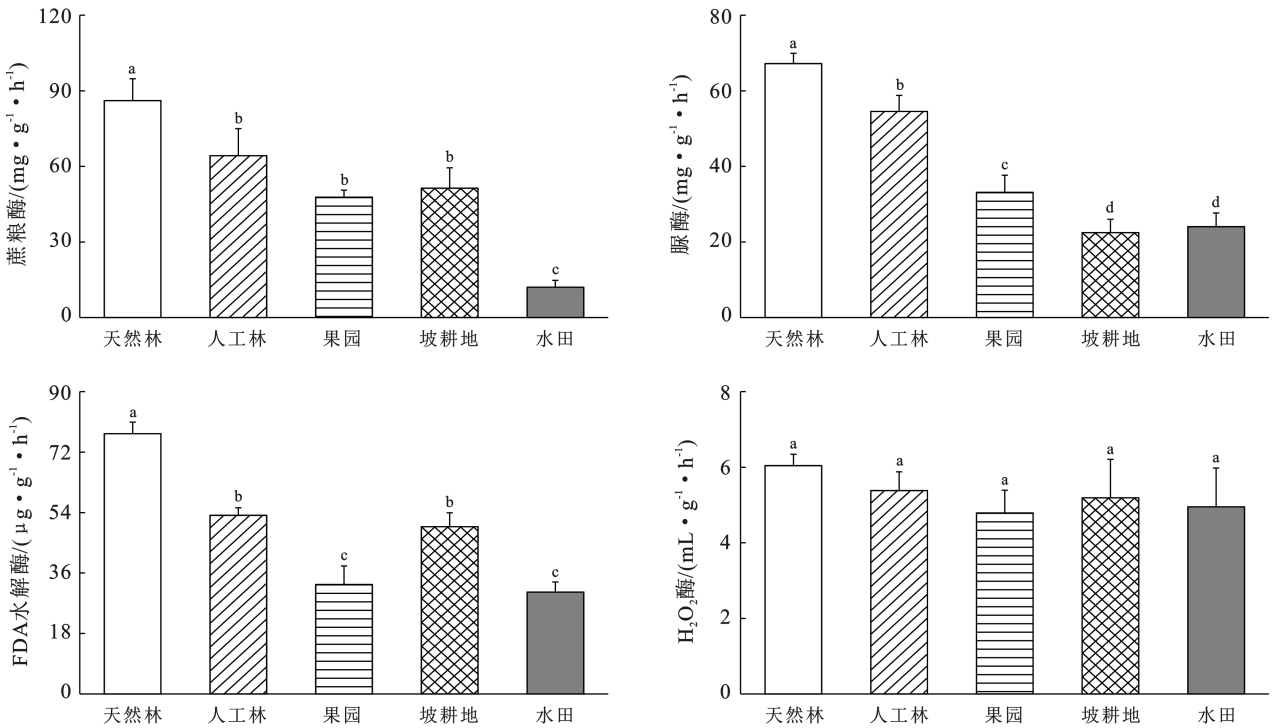


图 2　天然林转换对土壤酶活性的影响

Fig.2　Effects of native forest conversion on enzyme activity in soil

此外,土壤 DOC 含量与 pH 值呈显著负相关,但活性有机碳组分(DOC 除外)含量、酶活性与 TP 含量呈显著正相关($p<0.05$,表 5)。土壤活性有机碳组分含量(MBC 除外)、酶活性与 TN,NH_4^+-N,DON 含量呈显著正相关,以 DON 的相关系数相对最高(表 5)。

表 4　土壤活性有机碳组分含量与酶活性的相关系数

Table 4　Correlation coefficient between soil labile organic carbon fractions and enzyme activities

项 目	LFOC	cPOC	fPOC	ROC	DOC	MBC
蔗糖酶	0.57*	0.77**	0.59*	0.82**	ns	ns
脲 酶	0.79**	0.85**	0.82**	0.92**	0.63*	0.56*
FDA 水解酶	0.63**	0.79**	0.71**	0.87**	ns	ns
H_2O_2 酶	0.74**	0.86**	0.79**	0.92**	ns	0.62*

注:*,**,ns 分别表示在 $p<0.05$,$p<0.01$ 和 $p>0.05$ 水平上有显著差异。

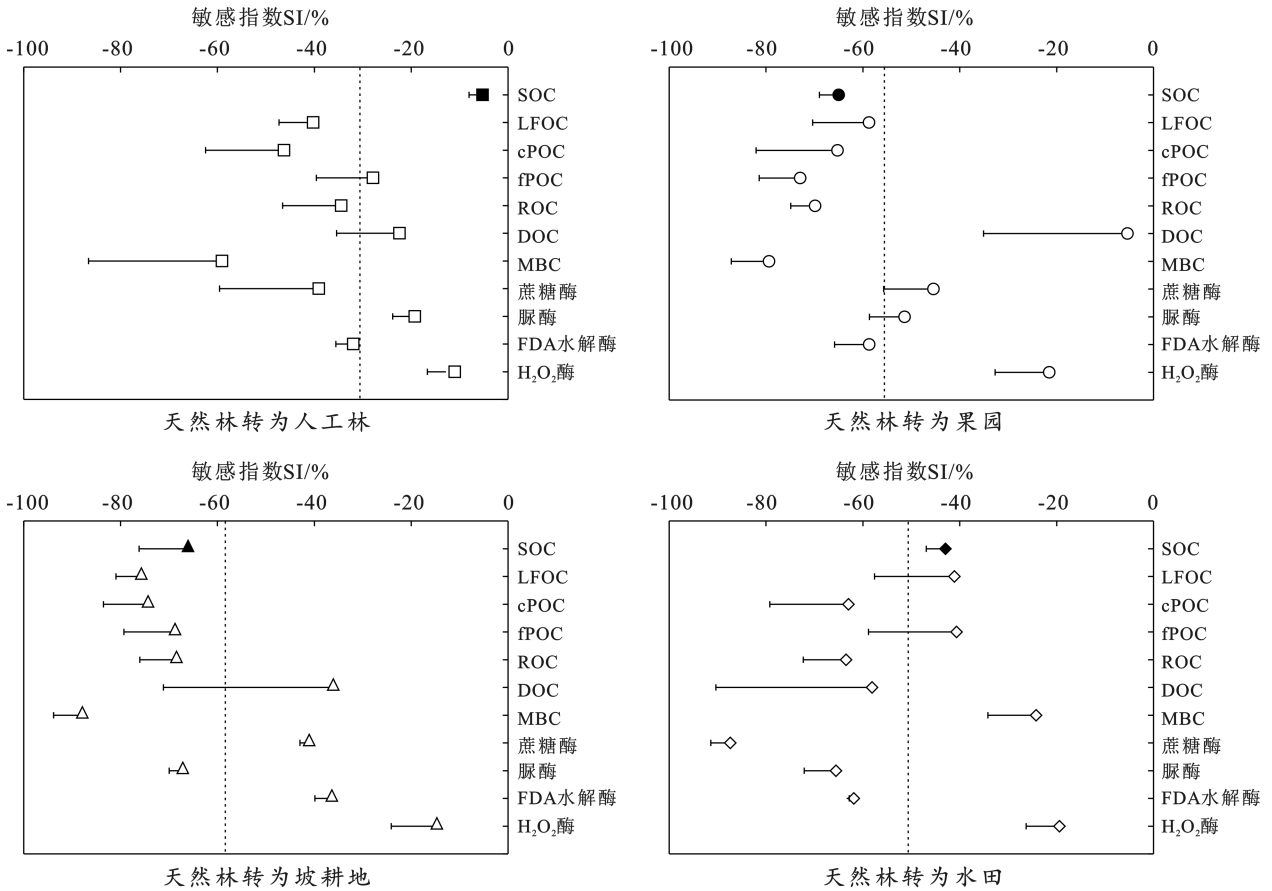
表 5　土壤活性有机碳组分含量、酶活性与土壤化学性质的相关系数

Table 5　Correlation coefficient among soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and soil chemical properties

项 目	LFOC	cPOC	fPOC	ROC	DOC	MBC	蔗糖酶	脲酶	FDA 水解酶	H_2O_2 酶
pH 值	ns	ns	ns	ns	−0.69**	ns	ns	ns	ns	ns
TP	0.78**	0.76**	0.74**	0.72**	ns	0.66**	0.53*	0.58*	0.70**	0.81**
TN	0.78**	0.81**	0.85**	0.81**	0.52*	ns	0.59*	0.74**	0.78**	0.85**
DON	0.85**	0.88**	0.88**	0.96**	0.53*	0.66**	0.74**	0.89**	0.85**	0.92**
NH_4^+-N	0.77**	0.82**	0.79**	0.84**	0.78**	ns	0.68**	0.90**	0.73**	0.75**

2.4　土壤活性有机碳组分、酶活性对天然林转换的响应敏感性

土壤 LOC 组分与酶活性的 SI 值范围类似(−88%～−5%,−89%～−11%),均为负值(图 3)。天然林转换为人工林、果园、坡耕地和水田,土壤 ROC 和 MBC 的 SI 值均高于 SOC 含量的 SI 值。SI 值大小和范围取决于天然林转换后的土地利用类型。天然林转换为人工林、果园、坡耕地和水田,SI 平均值分别为−32%,−54%,−58%和−51%,SI 值变化范围分别为−60%～−11%,−80%～−5%,−88%～−14%和−89%～−18%。天然林转换为果园、坡耕地的 SI 值范围最宽,以天然林转换为人工林的 SI 值范围最窄。天然林转换为果园、坡耕地,土壤 LOC 组分的 SI 值呈高于酶活性的 SI 值的趋势。



注:虚线为不同土壤指标 SI 平均值;实心箭头为对照 SOC。

图 3 土壤活性有机碳组分、酶活性对天然林转换响应的敏感性

Fig.3 Sensitivity index (SI) of soil organic carbon fractions and enzyme activities in response to native forest conversion

3 讨论

土壤微生物生长繁殖过程分泌多种酶,催化活性有机碳分解,调控土壤碳库质量与土壤健康的短期变化。基于物理、化学与生物化学方法,测定的土壤活性有机碳组分含量与土壤类型、植被覆盖和土地管理措施密切相关[4]。本研究中,天然林转换显著降低土壤 LFOC,cPOC,fPOC 和 ROC 含量。这可能是天然林转换后土壤有机质输入减少和矿化分解损失加剧及土壤有机碳净损失的结果[3-4]。与天然林相比,人工林、果园和农用地土壤活性有机碳含量均呈降低趋势。原因可能是,人工林、果园和农用地植物物种的组成相对单一,来自地上凋落物、地下细根生物量较低和人为干扰造成土壤活性有机碳流失[3]。本课题组前期研究表明,中亚热带天然林转为人工林、果园和坡耕地凋落物层厚度由 4 cm 削减至 0.5 cm,凋落物现存量由 7.6 t/hm^2 减少到 0.5 t/hm^2,0—60 cm 土层细根生物量降低了 50%～90%[3,15]。本区域研究也显示,天然林改为杉木人工林和针阔混交林,凋落物现存量分别降低了 79%和 21%[16]。此外,天然林转换后,植被覆盖减少,土温升高;加之频繁耕作破坏大团聚体,外源新鲜有机物投入产生正激发效应,均可加速土壤活性有机碳分解损失[15,17]。

然而,天然林改为人工林,土壤 DOC 含量未有显著变化。这与 Wang Qingkun 等[18]在本区域邻近试验地的研究结果基本一致。土壤 DOC 主要来源于凋落物渗滤液、根系分泌物和微生物降解产物,它的含量与植被类型(例如:凋落物量、根系生物量、林冠层密度和林龄)关系密切[19]。本研究中,天然林与人工林土壤 DOC 含量类似,可能与所选针叶人工林为成熟林(30～35 a 生),凋落物量和根系生物量相对较高有关,但具体原因,仍有待进一步探索。有报道称,天然林改为展叶松人工林,集约经营 10 a 后,土壤 SOC 和 DOC 含量存在回升现象,推测可能与人工林养分归还特征有关[20]。天然林与水田土壤 MBC 含量也类似,这与以往整合研究结果基本一致[21]。在稻作系统中,水稻秸秆归还量和根系分泌物量较高,可为土壤微生物生长繁殖提供充足的有机碳源[22]。

天然林转换后,土壤活性有机碳组分的响应敏感度不同。土壤 ROC,MBC 的 SI 值高于 SOC 的 SI

值，反映土壤 ROC，MBC 敏感地指示 SOC 的变化。有研究表明，在不同土地利用和农业管理下，土壤 MBC，POC 和 ROC 敏感地指示土壤健康差异[5,23-24]。与土壤 MBC 相比，ROC 室内化验程序更简单，分析成本更低，用风干土即可测试，更适宜于农业推广应用。与天然林改为坡耕地、果园和水田相比，天然林改为人工林，土壤有机碳及其活性组分含量的降幅更低。这可能与针叶人工林凋落物归还量高、难分解损失有关[3]。天然林改为人工林，更有利于土壤有机碳及其活性有机碳库的累积与保存。在土地利用转型、土地空间结构优化时，应考虑土壤的碳源/汇效应，助力实现碳达峰、碳中和“3060”目标。

LOC/SOC 指示土壤有机碳库的质量[15]。天然林改为人工林，土壤 LFOC/SOC，ROC/SOC 和 cPOC/SOC 显著降低，这些比值的下降指示土壤有机碳库的质量大幅下降。因此，土壤 LFOC/SOC，ROC/SOC 和 cPOC/SOC 可作为土壤碳库质量变化的敏感指示指标。本课题组之前报道，花岗岩红壤 ROC/SOC 对天然林转换的响应不敏感[3]。然而，本研究所选土壤为板岩风化物发育的红壤，土壤黏粒含量（285 g/kg）高于花岗岩红壤的黏粒含量（197 g/kg）。受土壤黏粒保护的 ROC 对天然林转换的响应可能更敏感[25]。天然林改为水田，土壤 ROC/SOC 和 DOC/SOC 显著降低，且 DOC/SOC 降幅比 SOC 降幅高。原因可能有 3 个方面：①水田 ROC 和 DOC 含量低于天然林；②水田长期淹水，不利于土壤微生物分解矿化有机碳；③水田溶解性有机质易流失，导致 DOC/SOC 降低[26]。

土壤酶活性受植物根系、凋落物、微生物群落及人为活动的强烈调控，也是土壤健康短期变化的预警指标。土壤中蔗糖酶催化蔗糖水解，释放果糖和葡萄糖，参与土壤有机质矿化过程[27]。天然林转换显著降低土壤蔗糖酶活性，以水田降幅最大，可能与水田长期淹水条件、养分易流失和基质有效性较低有关[28-29]。土壤酶活性与活性有机碳组分、土壤养分呈正相关。这进一步表明，基质有效性是调控土壤酶活性的关键因素之一。据报道，天然林转换显著降低土壤养分有效性和土壤酶活性[27]。

土壤中脲酶促进有机碳—氮键的水解，催化尿素水解为氨和 CO_2，改善土壤酸碱性[30]。天然林转换后，土壤中脲酶、FDA 水解酶与蔗糖酶活性变化趋势类似，也可能主要与土壤基质及养分有效性降低有关。然而，土壤 H_2O_2 酶活性对天然林转换的响应不敏感，可能与 H_2O_2 酶自身特性有关[27]。天然林改为坡耕地、水田，土壤蔗糖酶活性 SI 值高于 SOC 的 SI 值。这表明，土壤中蔗糖酶活性能敏感地指示 SOC 的短期变化。天然林转换为果园、坡耕地，土壤 LOC 组分比酶活性的响应更敏感，说明 LOC 组分可能具有更强的指示能力。

4　结论

与毗邻的中亚热带原生天然常绿阔叶林相比，转换为人工林、果园、坡耕地和水田，土壤活性有机碳含量、蔗糖酶、脲酶和 FDA 水解酶活性均显著降低，其响应的敏感性取决于土地转换方式/类型。与天然林转换为果园、坡耕地和水田相比，天然林转换为人工林的敏感性更低，相对有利于土壤中活性有机碳库的保存。在土壤活性有机碳组分中，ROC 和 MBC 对天然林转换的响应很敏感，可指示土壤 SOC 库的短期变化，特别是 ROC 更适宜于推广应用。土壤 ROC/SOC，LFOC/SOC 和 cPOC/SOC 可敏感地指示天然林转换为人工林土壤碳库质量变化。土壤蔗糖酶活性具有指示 SOC 短期变化的潜力。天然林转换大幅降低土壤活性有机碳含量和有机碳库质量，与之相关的酶活性也显著降低；土壤有机碳库活性、酶活性的下降，指示天然林转换后土壤生物健康/质量退化。

［参　考　文　献］

［1］ Food and Agriculture Organization of the United Nations. Forestry Department. Global forest resources assessment 2020：Main report［R］. Rome：Food and Agriculture Organization of the United Nations，2020.

［2］ Sheng Hao，Yang Yusheng，Yang Zhijie，et al. The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China［J］. Global Change Biology，2010，16(3)：1107-1121.

［3］ Sheng Hao，Zhou Ping，Zhang Yangzhu，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.

［4］ Beillouin D，Cardinael R，Berre D，et al. A global overview of studies about land management，land-use change，and climate change effects on soil organic carbon［J］. Global Change Biology，2022，28(4)：1690-1702.

［5］ Liptzin D，Norris C E，Cappellazzi S B，et al. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments［J］. Soil Biology and Biochemistry，2022，172：108708.

［6］ Bongiorno G，Bünemann E K，Oguejiofor C U，et al. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe［J］. Ecological Indicators，2019，99：38-50.

[7] Duan Liangxia, Sheng Hao, Yuan Hong, et al. Land use conversion and lithology impacts soil aggregate stability in Subtropical China [J]. Geoderma, 2021, 389: 114953.

[8] Pérez-Guzmán L, Phillips L A, Seuradge B J, et al. An evaluation of biological soil health indicators in four long-term continuous agroecosystems in Canada [J]. Agrosystems, Geosciences & Environment, 2021, 4(2): e20164.

[9] Liang Chao, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage [J]. Nature Microbiology, 2017, 2: 17105.

[10] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.

[11] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1799-1806.

[12] 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.

[13] Blair G J, 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): 1459.

[14] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[15] 盛浩,李洁,周萍,等.土地利用变化对花岗岩红壤表土活性有机碳组分的影响[J].生态环境学报,2015,24(7):1098-1102.

[16] 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.

[17] Fang Yunying, Singh B P, Farrell M, et al. Balanced nutrient stoichiometry of organic amendments enhances carbon priming in a poorly structured sodic subsoil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 145: 107800.

[18] Wang Qingkui, Xiao Fuming, He Tongxin, 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.

[19] 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.

[20] Mujuru L, Gotora T, Velthorst E J, et al. Soil carbon and nitrogen sequestration over an age sequence of *Pinus patula* plantations in Zimbabwean Eastern Highlands [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 313: 254-265.

[21] Liu Yalong, Ge Tida, Zhu Zhenke, et al. Carbon input and allocation by rice into paddy soils: a review [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 133: 97-107.

[22] 章晓芳,郑生猛,夏银行,等.红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征[J].环境科学,2020,41(3):1466-1473.

[23] Ramesh T, Bolan N S, Kirkham M B, et al. Soil organic carbon dynamics: impact of land use changes and management practices: a review [J]. Advances in Agronomy, 2019, 156: 1-107.

[24] Padbhushan R, Kumar U, Sharma S, et al. Impact of land-use changes on soil properties and carbon pools in India: a meta-analysis [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 9: 794866.

[25] 吴慧,赵志忠,吴丹.海南西部热带雨林次生林土壤易氧化有机碳分布特征及影响因素[J].广东农业科学,2022,49(6):74-80.

[26] 魏早强,罗珠珠,牛伊宁,等.土壤有机碳组分对土地利用方式响应的 Meta 分析[J].草业科学,2022,39(6):1115-1128.

[27] 周际海,郜茹茹,魏倩,等.旱地红壤不同土地利用方式对土壤酶活性及微生物多样性的影响差异[J].水土保持学报,2020,34(1):327-332.

[28] 邰继承,靳振江,崔立强,等.不同土地利用下湖北江汉平原湿地起源土壤有机碳组分的变化[J].水土保持学报,2011,25(6):124-128.

[29] Waring B G, Weintraub S R, Sinsabaugh R L. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils [J]. Biogeochemistry, 2014, 117(1): 101-113.

[30] 涂志华,周凌峰,黄艳萍,等.海南岛黎母山国家自然保护区热带云雾林土壤酶活性的根际效应[J].水土保持通报,2021,41(3):1-7.