

# 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响

唐国勇<sup>1,2</sup>, 李 昆<sup>1,2\*</sup>, 孙永玉<sup>1,2</sup>, 张春华<sup>1,2</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224; 2. 国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位研究站, 云南 昆明 650224)

**摘要:**土壤碳库管理指数反映土壤管理的科学性。对比研究了干热河谷新银合欢林、苏门答腊金合欢林、大叶相思林、印楝林、荒地和旱耕地土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(ROC)含量和土壤碳库管理指数。结果表明:6种土地利用方式下SOC和ROC含量范围分别为4.22~5.92 g·kg<sup>-1</sup>和1.34~2.33 g·kg<sup>-1</sup>。各利用方式之间SOC含量差异不显著,但4类人工林ROC含量均显著( $P < 0.05$ )高于旱耕地和荒地。SOC与ROC含量存在极显著( $P < 0.001$ )线性相关关系( $R^2$ 为66.3%)。以荒地作为参照,4类人工林土壤碳库管理指数变化范围为1.77至2.36,旱耕地为0.99。研究揭示:植被凋落量和管理措施是不同利用类型ROC含量变异的主要原因。在干热河谷生态脆弱地区,封禁管理有助于人工林土壤碳库的提高,而旱耕地土壤碳库处于不良管理状况。

**关键词:**干热河谷;土壤有机碳;易氧化有机碳;碳库管理指数;土地利用方式

中图分类号:X144, S714

文献标识码:A

## Effects of Land Uses on Soil Organic Carbon and Carbon Pool Management Index

TANG Guo-yong<sup>1,2</sup>, LI Kun<sup>1,2</sup>, SUN Yong-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Chun-hua<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Yuanmou Desertification Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Kunming 650224, Yunnan, China.)

**Abstract:** Carbon management index ( $I_{CM}$ ) is used to evaluate the scientificity of soil management. Soil organic carbon (SOC) and readily oxidized carbon (ROC) contents under *Leucaena leucocephala* stand, *Acacia glauca* stand, *Acacia auriculiformis* stand, *Azadirachta indica* stand, wasteland and dry cropland were determined and their  $I_{CM}$  were calculated. The results showed that the SOC and ROC contents under the 6 land use types were 4.22—5.92 g·kg<sup>-1</sup> and 1.34—2.33 g·kg<sup>-1</sup>, respectively. No significant differences in SOC contents among these land uses were observed. The ROC contents under the 4 types of woodland, however, were significantly higher than these under dry cropland or wasteland ( $P < 0.05$ ). The ROC were high significantly ( $P < 0.001$ ) correlated ( $R^2$  is 66.3%) with SOC. Compared with wasteland, the  $I_{CM}$  ranged from 1.77 to 2.36 under these woodlands, and 0.99 under dry cropland. It is revealed that the litter quantity and land management under these land uses may be the key factors resulting in the variation of ROC. At ecological fragile region of Dry-hot Valley, closure management is useful to sequester C in woodland soils. However, the management systems for soil carbon pool under dry cropland

收稿日期: 2011-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(31100462); 中国林业科学研究院资源昆虫研究所基本科研业务专项(rirical201001M); 林业公益性行业专项(201104002-3-2)

作者简介: 唐国勇(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事西南造林困难区域土壤与环境生态研究. E-mail: tangguoyong1980@gmail.com.

\* 通讯作者.

are not in a sound way.

**Key words:** Dry-hot Valley; soil organic carbon; readily oxidized carbon; carbon pool management index; land uses

土壤有机碳(SOC)是土壤肥力的物质基础,其含量水平在一定程度上决定土壤肥力高低,也是生态恢复评价的重要指标<sup>[1]</sup>;然而土壤中有有机碳背景值较高,变化趋势在较短时间内难以监测。SOC 数量和质量动态最初主要还是通过其活性部分的变化表现出来,而且活性有机碳的变化易于监测和测定<sup>[2-5]</sup>。因此,常用土壤活性有机碳的变化来指示SOC 库的动态特征<sup>[6-9]</sup>。土壤活性有机碳是指土壤中移动快、稳定性差、易氧化和分解,并具有较高植物和土壤微生物活性的那部分有机碳<sup>[2, 4]</sup>,可用化学方法和物理方法进行测定,用化学方法测定的有机碳称为易氧化有机碳(ROC)<sup>[2, 10]</sup>。国内外已有研究表明,短期内土地利用方式或植被类型变化对SOC 和 ROC 有明显的影响<sup>[4, 6, 9, 11]</sup>。

土壤碳库管理指数( $I_{CM}$ )是 Lefroy 等<sup>[12]</sup>提出的,用以评价土壤管理措施引起土壤有机质的变化,反映土壤经营管理的科学性。该指数可以度量土壤有机碳库管理状况,指数上升表明经营管理方式对土壤有培肥作用,土壤性能向良性发展,即土壤有机碳库处于良性管理状况,反之则表明土地管理措施使土壤肥力下降,土壤性质向恶性方向发展,即土壤管理措施不科学<sup>[3, 8]</sup>;因此,探究 SOC、ROC 含量特征和  $I_{CM}$  对于理解生态恢复过程中土壤的固碳机制及其对土壤经营管理的响应具有重要意义。目前,已有干热河谷生态脆弱区植被类型对土壤肥力影响方面的报道<sup>[13-14]</sup>,但尚不清楚不同植被类型下 SOC 和 ROC 含量特征及其碳库管理状况。基于此,本研究对比研究 4 类人工林、荒地和旱耕地 SOC、ROC 含量和  $I_{CM}$  特征,以期为合理利用干热河谷土地资源和阐明土壤固碳机制提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省元谋县,是干热河谷的典型代表<sup>[7, 13-14]</sup>。本研究设在国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位观测站(101°51'47" E、25°40'11" N)。该地区气候炎热干燥,干湿季分明,年均气温为 21.9 °C,  $\geq 10$  °C 年积温为 8 003 °C,无霜期 360 ~ 365 d,年降水量 630.7 mm,雨季(6—10 月)降水量占全年降水量的 90% 以上,年蒸发量约为 3 426.3 mm。研究区具体生态环境状况详见文献[7]。

2001 年 5 月(雨季之前)选取总面积约 2.8 hm<sup>2</sup> 的退化区域进行植被恢复,该区域生态环境恶劣,植被稀疏,以坡柳(*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq)和扭黄茅(*Heteropogon contortus* (Linn.) Beauv.)为主,立地条件相对一致,海拔约 1 100 ~ 1 120 m,坡度约 12 ~ 15°,以阳坡为主,土壤类型为燥红土。造林树种有新银合欢(*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit)、苏门答腊金合欢(*Acacia glauca* (L.) Moench)、大叶相思(*Acacia auriculiformis* A. Cunn)和印楝(*Azadirachta indica* A. Juss)等速生生态树种。造林方式为撩壕整地、容器苗造林,采取封禁管理。同时,选取植被状况相对较好的样区进行自然恢复(荒地),开垦土表相对平整的样区进行旱耕作(旱耕地),各植被类型样区的面积见表 1。参照当地生产习惯,旱耕地一年三熟,主要种植玉米和蔬菜(西红柿、辣椒、豆角等)。到 2009 年 4 月(生态恢复 8 a 后),人工林植被生长良好,荒地植被主要为扭黄茅,植被盖度由 0% (即“光板地”)到 80%,平均盖度为 32%。

表 1 研究区基本情况

土地利用方式	面积/hm <sup>2</sup>	采样数/个	土壤碳氮比	土壤密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	植被凋落量/(t·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度(或植被盖度)/%	土壤含水量/%	
							旱季初期	旱季末期
新银合欢林	1.0	10	6.88	1.52	0.74	83	10.2	9.0
苏门答腊金合欢林	0.3	3	6.75	1.50	0.60	77	10.0	9.2
大叶相思林	0.3	4	7.02	1.53	2.09	92	9.7	8.9
印楝林	0.3	3	7.04	1.56	1.47	66	8.8	8.0
旱耕地	0.3	3	6.19	1.38	2.80	/	37.4	36.1
荒地	0.6	7	7.81	1.64	0.20	32	8.3	7.8
总体	2.8	30	/	/	/	/	/	/

## 1.2 土壤样品采集与植被调查

2009年4月按土地利用方式采集土样,采样方法参照文献[15],具体步骤为:在6类样区内分别随机设置一定数量的15 m × 15 m样方,样方密度为10~13个·hm<sup>-2</sup>,在每个样方内按“S”形多点(不少于7个)采集表层土样(0~20 cm),采样时除去土表凋落物,样方内土样混合形成一个混合样;同时用环刀法测定土壤密度。共采集土壤混合样30个(表1)。取样时旱耕地种植玉米(2009年3月中旬种植)。

在干热河谷,新银合欢、苏门答腊金合欢是旱季落叶植物,每年11月底至翌年1月底,应该落的叶基本落光。大叶相思和印楝属旱季换叶植物,每年11月中旬至翌年3月换叶量占全年的80%以上。2008年10月至2009年4月在林地和荒地样区内分别随机设置3~4个1 m × 1 m的样方,收集样方内植被凋落物,除去杂质后风干称质量。旱耕地作物残体凋落量极低,本研究根据作物产量、根茎比、根茬返还比例等估算根茬残留量。

2008年10月(旱季初期)和2009年4月(旱季末期)用TDR水分仪(Field Scout TDR 200 Probe,美国)测定0~20 cm土层含水量。测定前3天旱耕地未灌溉。

## 1.3 样品分析与数据处理

土样采回后,用手选法除去活体根系和可见植物残体,风干、磨细过100目筛,待用。SOC采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,全氮采用半微量开氏法测定,ROC采用重铬酸钾氧化-稀释热法测定<sup>[15]</sup>。

$I_{CM}$ 是指土壤有机碳与对照土壤有机碳的比值乘以土壤有机碳的活度指数,碳库活度即土壤碳的不稳定性,其活度指数表征碳损失及其对稳定性的

影响<sup>[3,8]</sup>。碳库管理指数及其相关参数计算公式如下:

碳库活度 = 易氧化有机碳 / (总有机碳 - 易氧化有机碳);

活度指数 = 样品碳库活度 / 参照样品碳库活度;

碳库指数 = 样品总有机碳 / 参照样品总有机碳;

碳库管理指数 = 活度指数 × 碳库指数

荒地处于自然恢复状态,人为干扰程度轻,本研究将荒地土样作为参照样品。

ROC与SOC之比称为土壤活性有机碳比率( $R_{R/C}$ ),可以指示有机碳活性强度<sup>[11]</sup>。

通过单因素方差分析(LSD法)比较土地利用方式之间土壤有机碳、易氧化有机碳含量差异的显著性;通过一元线性回归分析土壤有机碳与易氧化有机碳之间的关系。以上分析采用SPSS 11.0处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用方式对土壤有机碳(SOC)含量的影响

干热河谷6种土地利用方式下SOC平均含量为4.85 g·kg<sup>-1</sup>,变异系数为27.8%,属于中等程度变异(表2),其中,苏门答腊金合欢林SOC含量最高,为5.92 g·kg<sup>-1</sup>;荒地SOC含量最低(4.22 g·kg<sup>-1</sup>),约为最高含量的70%。各利用方式下SOC含量高低顺序为:苏门答腊金合欢林 > 新银合欢林(5.19 g·kg<sup>-1</sup>) > 旱耕地(5.01 g·kg<sup>-1</sup>) > 大叶相思林(4.58 g·kg<sup>-1</sup>) > 印楝林(4.31 g·kg<sup>-1</sup>) > 荒地;但方差分析表明:利用方式之间SOC含量差异均不显著。

表2 不同土地利用方式土壤有机碳、易氧化有机碳含量和土壤活性有机碳比率

植被类型	土壤有机碳			易氧化有机碳			土壤活性有机碳比率/%
	平均值/ (g·kg <sup>-1</sup> )	标准差/ (g·kg <sup>-1</sup> )	变异系数/ %	平均值/ (g·kg <sup>-1</sup> )	标准差/ (g·kg <sup>-1</sup> )	变异系数/ %	
新银合欢林	5.19 a	1.29	24.8	2.14 a	0.55	25.8	41.2
苏门答腊金合欢林	5.92 a	1.34	22.7	2.33 a	0.27	11.4	40.1
大叶相思林	4.58 a	0.48	10.4	2.03 a	0.22	10.8	44.4
印楝林	4.31 a	0.50	11.5	1.91 a	0.26	13.7	44.2
旱耕地	5.01 a	0.28	5.6	1.38 b	0.25	17.8	27.6
荒地	4.22 a	2.00	47.5	1.34 b	0.64	47.9	31.3
总体	4.85	1.35	27.8	1.86	0.58	31.4	38.1

注:各列中数字后不同字母表示均值差异达95%显著水平。

除旱耕地SOC含量属弱变异外(变异系数小于10%),其他5类利用方式下SOC变异程度偏高,尤

其是荒地(表2)。旱耕地SOC变异程度低,这主要是由于旱耕地频繁翻耕、混合,土壤性质相对均一。

林地地表起伏大,即使微地形上的差别,也可能导致有机碳积累条件迥异,某一点由于微地形凹陷而处于积累过程,数分米外的另一点可能由于微地形隆起而处于冲刷或裸露状况,导致林地土壤 SOC 含量存在明显的空间变异。林木生长状况差异影响地表植被凋落量,这加剧了林地 SOC 空间变异性<sup>[16]</sup>。荒地 SOC 存在明显的空间变异(变异系数接近 50%)则可能主要是由于荒地植被生长状况迥异,植被地表盖度由 0%~80%,这不仅影响了有机物输入量,也改变了地表性状(如温度和湿度),进而影响土壤有机质的分解与转化。

SOC 含量取决于有机物输入量与输出量之间的动态关系,有机物输入主要来源于植被凋落物、根系残体和有机肥施用等,有机物输出则主要是由于 SOC 的矿化。本研究 6 种利用方式之间 SOC 含量差异不显著,这可能与生态恢复时间不长(8 a)、土壤理化性质接近和凋落物特性有关。除旱耕地外,其他 5 种利用方式下土壤碳氮比、土壤密度和土壤含水量等理化因子接近(表 1),这在一定程度上降低了利用方式间 SOC 含量的变异性。大叶相思和印楝植被凋落量明显高于其他 2 类人工林,但 SOC 含量偏低(差异不显著),这可能由于大叶相思和印楝叶片厚而大、纤维含量高,叶片落地后不易分解,容易被河谷风吹出林地或于某一低凹处堆积;而新银合欢、苏门答腊金合欢等树种的小型叶片凋落后更紧贴地表,不易受风搬运并且容易分解<sup>[17]</sup>。尽管旱耕地作物根系残留量相对较大(表 1),而且施肥量大,但旱耕地土壤碳氮比和密度较小,作物秸秆和根茬就地焚烧、无机肥使用比例高、灌溉和耕作频繁等因素制约了旱耕地 SOC 含量的提高幅度。荒地 SOC 含量较低可能是由于荒地植被盖度较低(32%),裸露荒地 SOC 在干热河谷高温条件下处于耗竭状况,但旱季枯死的扭黄茅对 SOC 含量也起到一定的稳定作用。本研究中,6 种利用方式 SOC 含量范围为 4.22~5.92 g·kg<sup>-1</sup>,这与他人在该地区的类似研究结果相仿<sup>[13-14]</sup>。刘淑珍等<sup>[18]</sup>发现无明显退化的燥红土 SOC 含量高于 20 g·kg<sup>-1</sup>,明显高于本研究,显示了干热河谷土壤有机质恢复的长期性。唐国勇等<sup>[16]</sup>研究显示,干热河谷生态脆弱区植被恢复 4 a 后新银合欢林、大叶相思林和印楝林 SOC 含量分别为 3.60、3.52、3.42 g·kg<sup>-1</sup>,明显低于本研究的结果(生态恢复 8 a),甚至略低于本研究的荒地,表明恢复时间对 SOC 含量有明显的影响,

恢复时间越长越有利于 SOC 的积累。

## 2.2 土地利用方式对土壤易氧化有机碳(ROC)含量的影响

6 种利用方式土壤 ROC 平均含量为 1.86 g·kg<sup>-1</sup>,变异系数为 31.4%,略高于 SOC 的变异系数。各利用方式间 ROC 含量高低顺序与 SOC 基本一致,表明二者之间存在一定的相关性,ROC 含量顺序为:苏门答腊金合欢林(2.33 g·kg<sup>-1</sup>)>新银合欢林(2.14 g·kg<sup>-1</sup>)>大叶相思林(2.03 g·kg<sup>-1</sup>)>印楝林(1.91 g·kg<sup>-1</sup>)>旱耕地(1.38 g·kg<sup>-1</sup>)>荒地(1.33 g·kg<sup>-1</sup>),其中,荒地和旱耕地 ROC 含量相对偏低,不足苏门答腊金合欢林的 60%。统计分析表明:人工林之间 ROC 含量差异不显著,但均显著( $P < 0.05$ )高于旱耕地和荒地。数据深度分析表明:SOC 与 ROC 含量存在极显著( $P < 0.001$ )的正线性相关关系,ROC 解释 SOC 变化的能力( $R^2$ )为 66.3%(图 1)。可见,不仅 SOC 可以作为土壤有机质的评价指标,ROC 也可以用来指示干热河谷土壤有机质水平。从本质上来看,ROC 较 SOC 更能反映土壤有机质状况,因为 SOC 含量的高低只表明土壤有机质的数量并不直接说明其质量,尤其是土壤有机质的潜在分解性质;而 ROC 是土壤有机质的活性部分,是土壤中有效性较高、易被分解转化的那部分有机质<sup>[2]</sup>。6 种利用方式之间 SOC 含量的差异不显著,而旱耕地和荒地 ROC 显著低于林地,这正显示出 ROC 表征土壤有机质变化比 SOC 更敏感。这与他人在其他地区的研究结果类似<sup>[3-4, 7-8]</sup>。

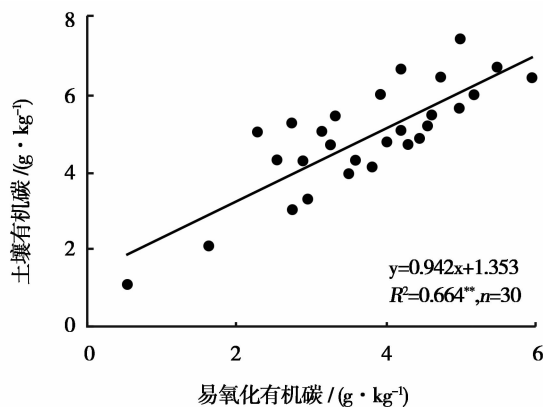


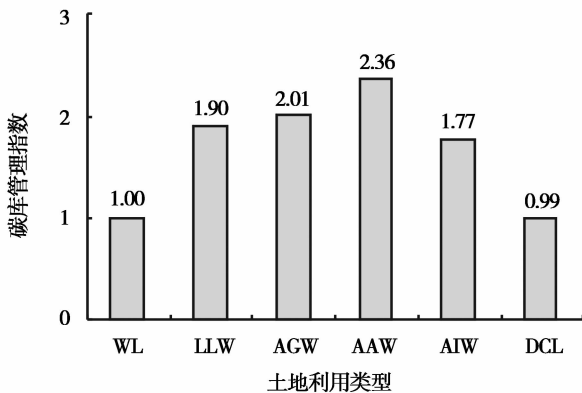
图1 土壤有机碳和易氧化有机碳含量的关系(\*\*:  $p < 0.001$ )

ROC 是土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解利用、对植物养分供应有最直接作用的那部分有机碳<sup>[3, 8]</sup>。王清奎等<sup>[6]</sup>研究发现:南方红壤丘陵地区阔叶林土壤活性有机质含量最高,杉木人工林其

次,竹林和水田最低。赵世伟等<sup>[19]</sup>认为,农田生态系统转换为林、草生态系统可以提高 ROC 含量。吴建国等<sup>[11]</sup>得出:西北半湿润半干旱灰褐土地区人工林的 ROC 含量最高,天然次生林其次,草地和农田 ROC 最低。本研究旱耕地和荒地 ROC 含量显著低于 4 类人工林(表 1),其原因可能与植被凋落量和管理措施有关。林地植被凋落量较高,凋落物的分解可以补充 ROC 的消耗<sup>[9]</sup>。荒地土壤有机物输入极其有限,ROC 分解后缺乏补充。旱耕地利用强度大(一年三熟)、翻耕和灌溉频繁等耕作管理措施改变了土壤的温度、湿度、孔隙状况和土壤微生物活性,使土壤湿润、疏松(表 1),更适合微生物活动,加速了 SOC 的分解,尤其是 ROC 的分解矿化<sup>[20]</sup>。

### 2.3 土地利用类型对土壤活性有机碳比率和土壤碳库管理指数的影响

土壤活性有机碳比率( $R_{R/C}$ )可以指示有机碳活性强度,该值越大说明其活度越高,有机碳矿化潜力大<sup>[21]</sup>。干热河谷 6 种利用方式  $R_{R/C}$  值范围为 27.6%~44.4%(表 2),其中 4 类人工林  $R_{R/C}$  均超过 40%。旱耕地和荒地  $R_{R/C}$  值较低,尤其是旱耕地(27.6%)。我国东北样带表层土壤  $R_{R/C}$  平均值为 1.31%<sup>[20]</sup>,西北半湿润半干旱灰褐土地区 6 类利用方式下  $R_{R/C}$  值在 10% 左右<sup>[11]</sup>,闽江河口湿地 5 类利用方式下的  $R_{R/C}$  值为 8%~20%<sup>[22]</sup>。本研究  $R_{R/C}$  范围明显偏高,平均值达 38.1%(表 2),这可能与干热河谷脆弱的生态环境和特殊的气候条件有关,但具体影响机制尚待揭示。



WL: 荒地; LLW: 新银合欢林; AGW: 苏门答腊金合欢林;  
AAW: 大叶相思林; AIW: 印楝林; DCL: 旱耕地

图2 不同土地利用方式土壤有机碳库管理指数( $I_{CM}$ )

本研究将荒地(自然恢复)土壤样品作为参考样品,计算不同利用方式碳库管理指数( $I_{CM}$ )。图 2

显示:土地利用方式之间  $I_{CM}$  差异明显,表明土壤碳库对各利用方式管理措施的反应各异。其中,人工林  $I_{CM}$  范围为 1.77~2.36,旱耕地  $I_{CM}$  略低于 1。 $I_{CM}$  是系统的、敏感的反映和监测土壤有机碳变化的指标,能够反映土壤质量下降或更新的程度,较为全面和动态地反映外界条件对碳库中各组分在量和质上的变化<sup>[3, 8, 22]</sup>。本研究人工林土壤活性有机碳比率和碳库管理指数均明显高于荒地,而旱耕地稍低于荒地。说明相对自然恢复(荒地)而言,人工林 SOC 活性高,碳库处于良性状况,其管理措施有助于土壤碳库的提高;而旱耕地 SOC 活性低、碳库管理不科学,耕作制度不利于土壤碳库的提高。这可能是由于林地处于封禁状况,人为干扰轻微;而旱耕地秸秆焚烧、耕作和灌溉频繁。这为干热河谷土壤有机碳库管理提供有益启示,即(1)林地 SOC 活性高,人为干扰或高强度开发可能会导致其 SOC 数量和质量迅速降低,因此宜减少对林地的人为扰动;(2)旱耕地土壤微生物活性强,宜采取增加有机物投入、加强土壤碳循环强度(如实施秸秆还土和快速催腐技术)、实施合理的轮作制、减少土地翻耕次数和耕作深度等措施,以促进旱耕地 SOC 的积累而增加固碳量、提高土壤肥力,又加快 SOC 的分解矿化以释放植物有效养分<sup>[1]</sup>,提高作物产量,减缓干热河谷日益突出的人地矛盾。

### 3 结论

干热河谷 6 种土地利用方式下土壤有机碳含量接近,但林地土壤易氧化有机碳含量显著高于旱耕地和荒地,4 类人工林之间易氧化有机碳含量的差异不显著。植被凋落量和管理措施是不同利用方式下易氧化有机碳含量差异的主要原因。相对自然恢复(荒地)而言,封禁条件下,林地土壤有机碳活度较高,有机碳库处于良性管理状况,而秸秆就地焚烧、耕作和灌溉频繁的旱耕地土壤有机碳活度较低,有机碳库管理不科学。

### 参考文献:

- [1] Janzen H H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 419-424
- [2] Blair G J, Lefroy R D. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems [J]. *Austrian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1459-1466
- [3] 徐明岗,于 荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳

- 库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723 - 729
- [4] Soon Y K, Arshad M A, Haq A, *et al.* The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil [J]. *Soil Tillage Research*, 2007, 95: 38 - 46
- [5] Belay-Tedla A, Zhou X H, Su B, *et al.* Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 110 - 116
- [6] 王清奎, 汪思龙, 高洪, 等. 土地利用方式对土壤有机质的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 360 - 363
- [7] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1365 - 1371
- [8] 戴全厚, 刘国彬, 薛蕙, 等. 侵蚀环境坡耕地改造对土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 17 - 21
- [9] 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: 71 - 78
- [10] 吕国红, 周广胜, 周莉, 等. 土壤溶解性有机碳测定方法与应用[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(2): 51 - 55
- [11] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 657 - 664
- [12] Lefroy R D, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and  $^{13}\text{C}$  natural isotope abundance [J]. *Plant & Soil*, 1993, 155 - 156: 399 - 402
- [13] 陈奇伯, 王克勤, 李艳梅, 等. 金沙江干热河谷不同类型植被改良土壤效应研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 67 - 70, 113
- [14] 郭玉红, 郎南军, 和丽萍, 等. 元谋干热河谷8种植被类型的林地土壤特性研究[J]. 西部林业科学, 2007, 36(2): 56 - 64
- [15] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统土壤观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007
- [16] 唐国勇, 李昆, 张昌顺. 施肥对干热河谷生态恢复区林木生长和土壤碳氮含量的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 185 - 189
- [17] 李昆, 曾觉民. 元谋干热河谷地区不同造林树种对土壤的改良作用研究[J]. 西南林学院学报, 1999, 19(3): 161 - 164
- [18] 刘淑珍, 黄成敏, 张建平, 等. 云南元谋土地荒漠化特征及原因分析[J]. 中国沙漠, 1996, 16(1): 1 - 8
- [19] 赵世伟, 卢璐, 刘娜娜, 等. 子午岭林区生态系统转换对土壤有机碳特征的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(5): 1030 - 1035
- [20] 王淑平, 周广胜, 高素华, 等. 中国东北样带土壤活性有机碳的分布及其对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2003, 27(6): 780 - 785
- [21] 贾国梅, 张宝林, 刘成, 等. 三峡库区不同植被覆盖对土壤碳的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2037 - 2040
- [22] 曾从盛, 钟春棋, 全川, 等. 土地利用变化对闽江河口湿地表层土壤有机碳含量及其活性的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 125 - 129