

# 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变

薛 蕙<sup>1,2</sup>, 刘国彬<sup>1</sup>, 潘彦平<sup>4</sup>, 戴全厚<sup>1,3</sup>, 张 超<sup>1</sup>, 余 娜<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院水利部水土保持研究所/西北农林科技大学, 杨凌 712100; <sup>2</sup>西安理工大学水利水电学院, 西安 710048;

<sup>3</sup>贵州大学林学院, 贵阳 550025; <sup>4</sup>北京市林业保护站, 北京 100029)

**摘要:**【目的】土壤碳库管理指数是表征土壤碳变化的重要量化指标, 研究黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数的变化过程对认识该地区生态恢复过程中土壤质量的演变及其效果评价具有重要意义。【方法】采用时空互代法, 以典型侵蚀环境纸坊沟流域生态恢复过程中不同年限的人工刺槐林为研究对象, 选取坡耕地和天然侧柏林为参照, 分析了植被恢复过程中土壤有机碳(TOC)、活性有机碳(LOC)、非活性有机碳(NLOC)及碳库管理指数(CPMI)的演变特征, 并运用相关和回归分析方法对生态恢复过程中碳库各组分和恢复年限进行拟合。【结果】营造刺槐林可以显著增加土壤碳库各组分含量, 并随恢复年限呈显著线性关系, 50 a 时 TOC、LOC、NLOC 和碳库指数(CPI)分别较坡耕地增加 271%、174%、467%和 271%, 其中 NLOC 增加速率略高于 LOC, 表明植被恢复增加的土壤碳素绝大多数以非活性形态贮存起来, 而为了满足生物生长所必须的活性物质来源, 土壤碳库必须维持一定的活度状态来满足碳素的动态转化平衡, 碳库管理指数在营造刺槐林初期显著降低, 随后先增加后降低, 与刺槐林生长特性密切相关; 但与天然林相比差距仍然较大, 恢复 50 a 时 TOC、LOC 和 NLOC 仅为侧柏林的 49%、34%和 61%。【结论】侵蚀环境下的坡耕地由于人为干扰, 土壤碳库含量偏低, 并处于高速低效率物质转化过程中, 人工刺槐林促进生态恢复可以依靠生物的自肥作用增加土壤碳库各组分含量, 但要恢复到破坏前该地区顶级群落时的水平, 还需要一个漫长的阶段, 这个阶段可能需要上百年的时间。

**关键词:** 黄土丘陵区; 人工刺槐林; 土壤活性碳库; 碳库管理指数

## Evolution of Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in the Artificial Robinia of Loess Hilly Area

XUE Sha<sup>1,2</sup>, LIU Guo-bin<sup>1</sup>, PAN Yan-ping<sup>4</sup>, DAI Quan-hou<sup>1,3</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, YU Na<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science/ Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi; <sup>2</sup>Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048;

<sup>3</sup>College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; <sup>4</sup>Beijing Municipal Forestry Protection Station, Beijing 100029)

**Abstract:** 【Objective】 Soil labile organic matter and carbon management index are important parameter representing carbon cycle in soil ecosystem. Study on dynamics of them in the artificial *Robinia* in loess hilly area so as to understand the change and effect evaluation during process of ecological restoration is of great importance. 【Method】 The research regarded Zhifanggou small watershed in typical erosion environment as a study plot, the selected artificial *Robinia* grown in different times were used as objects of study, the interchangeably space-time method was adopted and the sloping cropland and the plot where the *Platycladus orientalis* are grown were used as contrasts. Several indexes were analyzed such as TOC, LOC, NLOC and evolution characters of carbon management index in the period of ecological restoration. 【Result】 The study indicates that the content of soil carbon is on the low side because human behavior has a negative effect on sloping cropland. However, the content of every group soil carbon increased drastically by planting *Robinia*. With the increasing of the time of conservation, the relationship is very remarkable. After 50 years of restoration, the content of TOC, LOC, NLOC and AI in the study plot increased by 271%, 174%, 467%, and 271%, respectively, compared with sloping cropland. The increasing speed of NLOC was faster than LOC. It is assumed that the increased

收稿日期: 2008-04-14; 接受日期: 2008-10-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB407205)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-05)、国家自然科学基金重点资助项目(90502007)

作者简介: 薛 蕙(1978—), 男, 陕西西安人, 助理研究员, 博士, 研究方向为微生物生态与恢复生态学。Tel: 13679211517; E-mail: xuesha100@163.com。  
通信作者刘国彬(1958—), 男, 陕西榆林人, 研究员, 博士, 研究方向为流域管理。Tel: 029-87012907; E-mail: gblu@ms.iswc.ac.cn

carbon by restoration is stored in an inactive form to produce active matter which is necessary for biont. And the soil carbon must keep active to fulfill the balance of carbon dynamic transformation. At initial stages, soil carbon management index increased remarkably. Later it increased but is then declined eventually. The rate of the content of TOC, LOC and NLOC in the study plot grown with *Robinia* was 49%, 34% and 61% of the control respectively. 【Conclusion】 The results suggested that it is impossible to increase the content of every group soil carbon by planting *Robinia* in the loess hilly area, but much longer time, compared with degradation of soil fertility after deforestation, is required to reach to the climax before vegetation destruction.

**Key words:** hilly loess plateau; artificial *Robinia*; soil active carbon; carbon management index

## 0 引言

【研究意义】土壤有机碳是土壤的重要组成部分,是表征土壤肥力的一个重要参数,其指标已经被用来评价退化生态系统的恢复效果<sup>[1]</sup>。根据稳定性,可将其分为活跃(active)、慢性(slow)和惰性(passive)库<sup>[2]</sup>。其中具有移动快、稳定性差、易氧化、矿化的那部分称为活性碳,它对植物养分供应有最直接作用,可以灵敏反应不同农业生产措施对土壤碳库和潜在生产力的影响<sup>[3-4]</sup>,指示土壤有机质的早期变化<sup>[5-6]</sup>。土壤碳库管理指数是表征土壤碳变化的量化指标,常被用来监测土壤碳库动态的有效性和评价土壤质量的管理水平<sup>[7-9]</sup>。因此,研究黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数变化过程对认识该地区生态恢复过程中土壤质量的演变及其效果评价具有重要意义。【前人研究进展】黄土丘陵区地形破碎,土壤结构疏松,自然植被遭到严重破坏,是中国主要的水土流失区之一,该区也是国家退耕还林还草及生态建设的重点区域。恢复植被是该区水土保持与生态建设的重要措施,植被的恢复除有效保持水土,减少土壤侵蚀外,同时可以通过土壤-植物复合系统的改善来提高土壤质量。研究已经证明坡耕地可以导致土壤有机碳流失<sup>[10]</sup>,而人工林可通过次生演替恢复土壤特性和维持土壤肥力,从而实现重建动植物物种和恢复生态系统健康<sup>[11-12]</sup>,然而针对黄土丘陵区植被恢复演替过程中土壤活性有机碳演变和碳库管理指数变化的研究相对较少。【本研究切入点】因此本文以不同年限的人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia* L.)为研究对象,分析生态恢复过程中土壤活性有机碳及其管理指数的演变过程。【拟解决的关键问题】揭示植被恢复与重建对改善土壤生态环境的作用机制,为评价人工林促进生态恢复效果、土壤质量管理和山川秀美工程建设提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县纸坊沟流域(E109°13'46"~109°16'03", N36°46'42"~36°46'28"),该区地形破碎,沟壑纵横,属黄土高原丘陵沟壑地貌,暖温带半干旱季风气候,海拔1 010~1 400 m,年均气温8.8℃,年均降水量505.3 mm。土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主,抗侵蚀能力差,植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带。纸坊沟流域是中国科学院安塞水土保持试验站生态恢复定位试验研究小流域。该流域生态系统先后经历严重破坏期(1938—1958年)、继续破坏期(1959—1973年)、不稳定期(1974—1983年)、稳定恢复改善期(1983—1990年)和良性生态初步形成期(1991年至今)。经过30多年的水土保持综合治理,开展了林草植被和工程等措施建设,有效遏制了该流域的土壤侵蚀,成功地恢复了退化生态系统,林地面积从1980年的不足5%增加到40%以上,流域生态经济系统进入良性循环阶段<sup>[13]</sup>。

采用时空互代法在流域内选择营造和管理方法一致,土壤与成土母质类型相同,种植刺槐前均为坡耕地的5 a(RP5)、10 a(RP10)、15 a(RP15)、20 a(RP20)、25 a(RP25)、30 a(RP30)、40 a(RP40)和50 a(RP50)人工刺槐林为样地,选取坡耕地(sloping cropland, CK)和天然次生侧柏林(*Platycladus orientalis* L., PO)为对照样地,其基本特征及林下植被如表1。

### 1.2 样品采集及分析

2005年7月,在各试验样地按“S”型选取6点,用土钻法取0~20 cm土层混合土样,3次重复,风干后过1 mm和0.25 mm筛后测定土壤基本理化性质<sup>[14]</sup>和活性有机碳。全氮(TN)用半微量凯氏法测定;pH用pH计测定(水:土=2.5:1,日本产pH计);土壤全磷用碳酸钠熔融-钼锑抗比色法(岛津2401-紫外可见分光光度计,日本产);速效磷用Olsen法;速效钾用乙酸铵提取-火焰光度法;总有机碳用重铬酸钾氧化外加热法;活性有机碳(LOC)采用高锰酸钾氧化法<sup>[15-16]</sup>;非活性有机碳含量(NLOC)为总有机碳

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of the sampling plots

样地	恢复年限	地貌	坡向	坡度	海拔	土壤类型	林下草本类型
Sites	Age (a)	Relief	Slope aspect	Slope degree(°)	Altitude (m)	Soil type	Undergrowth vegetation
CK	0	梁坡 HS	N	22	1175	黄绵土 LS	谷子 <i>Setaria italic</i> L.
RP5	5	梁坡 HS	NW35°	21	1198	黄绵土 LS	茵陈蒿 <i>Achillea capillaris</i>
RP10	10	梁坡 HS	W	21	1171	黄绵土 LS	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
RP15	15	梁坡 HS	N	30	1150	黄绵土 LS	臭草-长芒草 <i>Melica scabrosa-Stipa bungeana</i>
RP20	20	梁坡 HS	NW45°	24	1029	黄绵土 LS	铁杆蒿-长芒草 <i>Artemisia sacrorum-Stipa bungeana</i>
RP25	25	梁坡 HS	NW45°	28	1249	黄绵土 LS	铁杆蒿-长芒草 <i>Artemisia sacrorum-Stipa bungeana</i>
RP30	30	梁坡 HS	NE10°	32	1129	黄绵土 LS	胡枝子-长芒草 <i>Lespedeza dahurica - Stipa bungeana</i>
RP40	40	梁坡 HS	N	25	1172	黄绵土 LS	铁杆蒿-长芒草 <i>Artemisia sacrorum-Stipa bungeana</i>
RP50	50	沟坡 GS	E	23	1183	黄绵土 LS	铁杆蒿-长芒草 <i>Artemisia sacrorum-Stipa bungeana</i>
PO	--	梁坡 HS	N1°W	33	1283	黄绵土 LS	披针苔 <i>Carex lanceolat</i>

HS、GS 分别表示梁坡和沟坡。LS 表示黄绵土 HS and GS means hillside and gully slope, respectively. LS means loessial soil

和活性有机碳含量之差。

土壤碳库管理指数以坡耕地土壤为参考土壤，其计算方法如下<sup>[17]</sup>：

碳库指数（CPI）=样品全碳含量（g·kg<sup>-1</sup>）/参考土壤全碳含量（g·kg<sup>-1</sup>）；

碳库活度（A）=活性碳含量/非活性碳含量；

碳库活度指数（AI）=样品碳库活度/参考土壤碳库活度；

碳库管理指数（CPMI）=碳库指数×碳库活度指数×100=CPI×AI×100。

1.3 数据统计分析

差异显著性采用 SAS 6.12 软件中的单因素方差

分析（ANOVA）方法分析，数据为 3 个重复的平均值，相关分析均采用 SAS 6.12 软件中相关分析（CORR）方法分析。

2 结果与分析

2.1 植被恢复过程对土壤有机碳、活性有机碳和非活性有机碳的影响

如表 2 所示，坡耕地改为刺槐林地后，土壤有机碳含量随种植年限增加明显，在种植 10 a 时与对照相比差异显著，20 a 后略有降低，随后缓慢上升，50 a 时达到最大值，为坡耕地的 3.71 倍，而仅为天然侧柏林的 49%；活性有机碳含量在恢复 15 a 显著提高，15~

表 2 不同年限人工刺槐林土壤活性有机碳及碳库管理指数演变

Table 2 Labile organic matter and carbon management index of soil in different revegetation periods

样地	有机碳	活性有机碳	非活性有机碳	碳库活度	碳库活度指数	碳库指数	碳库管理指数
Sites	TOC (g·kg <sup>-1</sup> )	LOC (g·kg <sup>-1</sup> )	NLOC (g·kg <sup>-1</sup> )	A	AI	CPI	CPMI
CK	2.74 g	1.52 d	1.22 g	1.243	1.000	1.000	100.000
RP5	2.81 g	1.31 d	1.51 fg	0.867	0.697	1.027	71.593
RP10	3.69 f	1.81 d	1.88 f	0.963	0.775	1.346	104.257
RP15	6.44 c	2.87 bc	3.58 c	0.801	0.644	2.351	151.412
RP20	6.52 c	3.03 bc	3.48 dc	0.870	0.700	2.378	166.410
RP25	5.93 d	3.06 bc	2.87 e	1.064	0.856	2.165	185.346
RP30	5.94 d	2.95 bc	2.99 e	0.986	0.793	2.169	171.967
RP40	5.57 e	2.65 c	2.92 e	0.908	0.730	2.032	148.394
RP50	10.18 b	3.25 b	6.93 b	0.468	0.377	3.714	139.868
PO	20.80 a	9.50 a	11.30 a	0.841	0.676	7.591	513.544

同一列数据后不同字母，表明样地之间达到 1% 的显著差异

Values in the same columns that do not contain the same letters are significantly different at the 1% level

40 a 处于稳定期, 随后开始缓慢上升, 50 a 时较坡耕地增加 114%, 为侧柏林的 34%; 非活性有机碳和总有机碳变化规律相似, 在恢复 5 a 时其含量显著提高, 15~40 a 趋于稳定并略有降低, 50 a 为坡耕地的 5.67 倍, 侧柏林的 61%。

2.2 植被恢复过程对土壤碳库活度、管理指数的影响

坡耕地退耕种植刺槐后土壤碳库活度和管理指数变化特征如表 2。土壤碳库活度和碳库活度指数在退耕后较坡耕地明显降低, 随着恢复年限的延长, 波动较为剧烈, 规律不明显。碳库指数随着恢复年限延长逐渐上升, 50 a 时为坡耕地的 3.71 倍, 但仅为侧柏林的 49%; 碳库管理指数在种植初期显著降低, 随之逐渐增加, 10 a 时超过坡耕地水平, 并随恢复年限延长

继续增加, 25~30 a 时达最大值, 随后开始缓慢降低, 50 a 时高出坡耕地 37%, 为侧柏林的 27%。

2.3 土壤活性有机碳、碳库管理指数与养分的耦合相互关系

对有机碳、活性有机碳、非活性有机碳、碳库管理指数与土壤主要肥力因子进行相关性分析(表 3)。结果表明, 有机碳、活性有机碳、非活性有机碳之间存在极显著相关, 而且它们分别与碳库指数、碳库管理指数、全氮、碱解氮和速效钾呈极显著相关; 碳库活度、活度指数和养分之间的相关性较弱, 仅与速效磷含量显著相关; 碳库指数、碳库管理指数除与有机碳等极显著相关外, 还与全氮、碱解氮、速效钾极显著相关。

表 3 土壤活性有机碳、碳库管理指数与养分因子相关性分析 (n=10)

Table 3 Correlation coefficient among labile organic matter and carbon management index and characteristics of soils (n=10)

	有机碳 TOC	活性有 机碳 LOC	非活性 有机碳 NLOC	碳库 活度 A	碳库活 度指数 AI	碳库 指数 CPI	碳库管 理指数 CPMI	全氮 TN	碱解氮 Available N	全磷 TP	速效磷 Available P	速效钾 Available K
有机碳 TOC	1.000	0.979**	0.988**	-0.416	-0.407	1.000**	0.946**	0.996**	0.931**	0.618	0.514	0.893**
活性有机碳 LOC		1.000	0.935**	-0.244	-0.235	0.979**	0.992**	0.974**	0.883**	0.603	0.427	0.831**
非活性有机碳 NLOC			1.000	-0.536	-0.526	0.988**	0.885**	0.984**	0.940**	0.612	0.566	0.914**
碳库活度 A				1.000	1.000**	-0.416	-0.127	-0.416	-0.539	-0.209	-0.663*	-0.626
碳库活度指数 AI					1.000	-0.406	-0.118	-0.407	-0.529	-0.209	-0.659*	-0.618
碳库指数 CPI						1.000	0.947**	0.996**	0.93**	0.618	0.514	0.893**
碳库管理指数 CPMI							1.000	0.943**	0.838**	0.592	0.359	0.772**

\*表示差异达显著水平 ( $P<0.05$ ), \*\*表示差异达极显著水平 ( $P<0.01$ )。下同  
Correlation coefficient labeled by \* and \*\* indicate significant difference at  $P=0.05$  and  $P=0.01$ , respectively. The same as below

2.4 土壤活性有机碳、碳库管理指数与恢复年限的耦合分析

对植被恢复过程中土壤有机碳、管理指数等随年限进行耦合分析, 结果如表 4 所示。有机碳、活性有机碳、非活性有机碳和碳库指数随着恢复年限呈线性

增长, 相关系数最小为 0.7774, 具有很好的统计学意义。回归方程显示, 植被恢复过程中土壤有机碳、活性有机碳、非活性有机碳和碳库指数的年增长率分别为  $0.119\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.035\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.084\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.044, 据此估算, 该区坡耕地土壤有机碳等属性指标要想恢复

表 4 土壤活性有机碳、碳库管理指数与恢复年限的耦合分析

Table 4 Correlation analysis between labile organic matter, carbon management index and years of restoration

土壤属性 Soil properties	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	估算年限 Years
有机碳 TOC ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$y = 0.1194x + 2.948$	$r = 0.8512^{**}$	149.5
活性有机碳 LOC ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$y = 0.0351x + 1.7334$	$r = 0.7774^{*}$	221.3
非活性有机碳 NLOC ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$y = 0.0843x + 1.2166$	$r = 0.8209^{**}$	119.6
碳库指数 CPI	$y = 0.0436x + 1.0765$	$r = 0.8511^{**}$	149.4

到破坏前天然林水平,分别需要 120~221 a,当然此处只是一种理想状态下的推算,实际中由于生态系统的复杂性,生物生长的周期性等各种因素都制约着生态恢复的进程,单方面依靠生物自身作用完成生态恢复过程在一定程度上是很难以实现的,但可以肯定地是相对于林地开垦后的土壤肥力退化<sup>[18-19]</sup>,靠人工刺槐林自肥能力来恢复土壤碳库含量在一定程度上是可能的,但此过程要漫长得多,因此必须从植被建设角度对林分管理及后续物种的引入进行深入研究来加速促进生态恢复的进程。

### 3 讨论

土壤作为一种独立的功能自然体,对水、肥、气、热及根系生长空间具有调节功能,同时又受各种环境因素的影响,土地利用方式的变化,可使土壤性质发生显著改变,其中最重要的表现之一就是有机碳库的变化。侵蚀环境下的坡耕地由于人类过度干扰,表土侵蚀严重,有机物质矿化加剧,碳库含量降低。随着弃耕营造刺槐林后,原来开放或半开放的农田生态系统物质循环结构转变为人工生态系统的封闭或半封闭物质循环结构,每年大量的枯枝落叶和营养元素等物质重新返回到生态系统中,并随着植被恢复演替的进行,枯枝落叶积累与分解逐渐增多促使土壤 TOC 含量和 CPI 增加,表明人工林具有较强的养分富集和培肥能力。土壤活性有机碳是在一定的时空条件下,受植物、微生物影响强烈、具有一定溶解性,在土壤中移动较快、不稳定、易氧化分解的土壤碳素,Blair 等<sup>[2]</sup>研究认为土壤碳库的变化主要发生在活性碳库部分,而苏静等<sup>[20]</sup>研究认为植被恢复主要增加的是非活性有机碳含量。笔者研究表明随着植被恢复,土壤活性和非活性有机碳都呈现出增加趋势,其中非活性有机碳在恢复初期增加幅度略高于活性有机碳,活性有机碳占有有机碳的 33.18%~55.42%,并随恢复年限逐渐降低。说明在植被恢复过程中,植物作为碳素的源以凋落物及降水养分淋溶形式把养分归还于土壤,而土壤作为库贮存碳素,随着植被恢复生物量增加,对作为生物生长所需速效基质的活性碳素需求逐渐增大,活性有机碳含量增加,但是归还到土壤中的物质增加幅度更大,其中大部分以非活性形态贮存下来,LOC/TOC 逐渐降低。张付申<sup>[21]</sup>研究认为土壤中 LOC/TOC 可以用来反映土壤有机碳的质量,LOC/TOC 越大,表示有机碳越易被微生物分解,质量也就越高。由此笔者认为植被恢复首先增加土壤的潜

在质量,也就是说在一定程度上,归还到土壤中的碳源在满足植被自身生长的需要外,大部分作为潜在的物质被贮存起来。而要维持生物生长的需要,又必须使碳库处于一种动态转化平衡状态,即有机碳库必须维持一定的活跃度,碳库活度(A)和碳库活度指数(AI)维持在一定范围。同时可以看出人工干扰较大的农田生态系统 A 和 AI 明显大于干扰相对较少的半自然生态系统,说明土壤碳素必须长期维持在一定的高速运转状态才能补偿人类对土壤的干扰,即在有人类胁迫的农田生态系统中,土壤可能是以一种高速度低效率的形式来完成物质转化。

碳库指数和碳库管理指数是系统的、敏感的反映和监测土壤有机碳变化的指标<sup>[8,22]</sup>,能够反映土壤质量下降或更新的程度<sup>[23-24]</sup>,较为全面和动态地反映了外界条件对碳库中各组分在量和质上的变化。在退耕初期,人类干扰减少,刺槐林尚处于生长初期,碳素需要量相对较少,因此碳素转化低速率运转;随着刺槐生长加速,对碳的需求增加,碳素转化速率增大;到了中龄和近熟期,刺槐生长加速,覆盖度增大,归还物质增多,碳素转化速率达到高峰;随后,随着土壤干层形成,刺槐生理机能降低,生长减慢开始衰败,碳素转化速率开始减慢。但是,随着林下植被的更新,特别是低等植物的出现,代谢途径更加多样化,后续演替物种将逐渐促进碳库管理指数进入新一轮的上涨,但是与天然侧柏林碳库管理指数相比还有很大差距。可见要恢复到该区演替顶级群落时的水平,还需要一个相当长的时期,这个阶段大约需要上百年的时间。相关性分析说明土壤有机碳、活性有机碳、非活性有机碳、碳库指数和碳库管理指数与土壤养分和植被生长特性最为密切,可以用来反映生态恢复过程。

### 4 结论

侵蚀环境下的坡耕地土壤碳库各组分含量较低,土壤碳库处于高速低效率运转。营造刺槐林后,随着归还物质的增多,碳库各组分均显著逐渐增加,其中非活性有机碳增加速率略高于活性有机碳。碳素的增加大部分以非活性形态作为潜在的物质贮存起来。同时土壤碳库又必须在一定范围内处于一种动态转化平衡状态来维持生物生长的需要,这种动态变化和刺槐林自身的生长发展有着密切的关系。虽然植被恢复可以显著改善土壤碳库含量,但是与天然林相比差距较大。

## References

- [1] 周国模, 姜培坤. 不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响. 水土保持学报, 2004, 18(6): 68-70.  
Zhou G M, Jiang P K. Changes in active organic carbon of erosion red soil by vegetation recovery. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 68-70. (in Chinese)
- [2] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, Ggilmanov T, Scholes R J, Schimel D S, Kirchner T, Menaut J C, Seastedt T, Moya E G, Kamnalrut A, Kinyamario J L. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grasslands biome world-wide. *Global Biogeochemistry Cycle*, 1993, 7: 785-809.
- [3] Dalal R C, Mayer R J. Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. IV. Loss of organic carbon from different density fractions. *Australian Journal of Soil Research*, 1986, 24: 301-309.
- [4] 邵月红, 潘剑君, 孙 波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究. 水土保持学报, 2005, 19(3): 24-28.  
Shao Y H, Pan J J, Sun B. Study on characteristics of soil organic carbon decompositions and carbon pool under different vegetations. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 24-28. (in Chinese)
- [5] Blair J, Lefroy R D B, Lisle G L. Soil carbon fractions based on the in degree of oxidation and the development to carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1459-1466.
- [6] 沈 宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38.  
Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 32-38. (in Chinese)
- [7] 李 琳, 李素娟, 张海林, 陈 阜. 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究. 水土保持学报, 2006, 20(3): 106-109.  
Li L, Li S J, Zhang H L, Chen F. Study on soil C pool management index of conservation tillage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 106-109. (in Chinese)
- [8] 徐明岗, 于 荣, 孙小凤, 刘 骅, 王伯仁, 李菊梅. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459-465.  
Xu M G, Yu R, Sun X F, Liu H, Wang B R, Li J M. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 459-465. (in Chinese)
- [9] 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. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.  
Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 723-729. (in Chinese)
- [10] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明. 黄土丘陵区退耕撂荒对土壤有机碳的积累及其活性的影响. 水土保持学报, 2004, 18(3): 78-80.  
Jia S W, He X B, Chen Y M. Effect of land abandonment on soil organic carbon sequestration in loess hilly areas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 78-80. (in Chinese)
- [11] Lamb D. Large-scale ecological restoration of degraded tropical forest lands: The potential role of timber plantations. *Restoration Ecology*, 1998, 6(3): 271-279.
- [12] Campbell B M, Frost P, King J A, Mawanza M, Mhlanga L. The influence of trees on soil fertility on two contrasting semi-arid types at Matopos, Zimbabwe. *Agroforestry Systems*, 1994, 28: 159-172.
- [13] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on Loess Plateau: challenge and prospective, *AMBIO*, 1999, 28(8): 663-668.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.  
Lu R K. *Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry*. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1999. (in Chinese)
- [15] 徐明岗, 于 荣, 王伯仁. 土壤活性有机质的研究进展. 土壤肥料, 2000, (6): 3-7.  
Xu M G, Yu R, Wang B R. Progress on the study of soil active organic matter. *Soils and Fertilizers*, 2000, (6): 3-7. (in Chinese)
- [16] Hu S J, van Bruggen A H C, Grünwald N J. Dynamics of bacterial population in relation to carbon availability in a residue-amended soil. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13: 21-30.
- [17] 沈 宏, 曹志洪. 施肥对土壤不同形态及碳库管理指数的影响. 土壤学报, 2000, 37(2): 166-173.  
Shen H, Cao Z H. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2): 166-173. (in Chinese)
- [18] 查 轩, 黄少燕. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程的影响. 山地学报, 2001, 19(2): 109-114.  
Zha X, Huang S Y. Effects of vegetation destruction on accelerated erosion and soil degradation processes on Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(2): 109-114. (in Chinese)
- [19] 史衍玺, 唐克丽. 林地开垦加速侵蚀下土壤养分退化的研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(4): 26-33.  
Shi Y X, Tang K L. Soil nutrient degradation under influence of forest land accelerated erosion. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1996, 2(4): 26-33. (in Chinese)

- [20] 苏 静, 赵世伟, 马继东, 杨永辉, 刘娜娜. 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 50-52.
- Su J, Zhao S W, Ma J D, Yang Y H, Liu N N. Influence of man-made vegetation on carbon pool in southern Ningxia Region in Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(3): 50-52. (in Chinese)
- [21] 张付申. 长期施肥条件下壤土和黄绵土有机质氧化稳定性研究. *土壤肥料*, 1996, (6): 32-41.
- Zhang F S. Study on oxidative stability of organic matter in Lou Soil and Loessal Soil under long-term fertilization. *Soils and Fertilizers*, 1996, (6): 32-41. (in Chinese)
- [22] 沈 宏, 曹志洪, 王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究. *自然资源学报*, 1999, 14(3): 206-211.
- Shen H, Cao Z H, Wang Z M. Study of carbon pool management index in soil under different agroecosystems. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(3): 206-211. (in Chinese)
- [23] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 669-681.
- [24] Logninow W, Wisniewski W, Strong W M. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20: 47-52.

(责任编辑 李云霞)