

## 不同植被恢复模式对黄土丘陵区土壤碳库及其管理指数的影响<sup>\*</sup>

戴全厚<sup>1,2</sup>, 刘国彬<sup>1</sup>, 薛 蕙<sup>1,3</sup>, 余 娜<sup>1,2</sup>, 张 超<sup>1</sup>, 兰 雪<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 3. 西安理工大学, 西安 710048)

**摘 要:** 为了解侵蚀环境下植被恢复对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响, 以典型侵蚀环境黄土丘陵区纸坊沟流域生态恢复 30 a 植被长期定位试验点为研究对象, 选取坡耕地为参照, 分析植被恢复过程中土壤碳库各组分和碳库管理指数的演变特征。结果表明, 侵蚀环境下植被恢复后土壤碳库各组分含量都得到显著改善, 有机碳、活性有机碳和非活性有机碳含量增幅分别为 109 % ~ 238 %, 194 % ~ 212 % 和 65 % ~ 149 %, 增加速度非活性有机碳 > 有机碳 > 活性有机碳。碳库指数和碳库管理指数较坡耕地明显增加, 增幅分别为 15 % ~ 659 % 和 6.5 % ~ 414 %, 说明土壤经营和管理水平较坡耕地得到了显著改善, 土壤系统向着良性方向转变。相关性分析表明有机碳、活性有机碳、非活性有机碳、碳库指数、碳库管理指数与土壤主要肥力因子相关性及其密切, 可以作为反映生态恢复过程土壤质量演变的指标。不同植被恢复措施可以显著改善土壤碳库含量, 增加土壤碳库管理水平, 但改善作用不同, 总体来说混交林的效果最好, 其次为纯林, 最后为荒草地, 因此在该地区要通过人工促进生态恢复, 应以营造混交林为主, 纯林为辅的恢复模式。

**关键词:** 侵蚀环境; 植被恢复; 土壤活性碳库; 碳库管理指数

**中图分类号:** S153.61

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2008)03-0061-04

## Effect of Different Vegetation Restoration on Soil Carbon and Carbon Management Index in Eroded Hilly Loess Plateau

DAI Quan-hou<sup>1,2</sup>, LIU Guo-bin<sup>1</sup>, XUE Sha<sup>1,3</sup>, YU Na<sup>1,2</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, LAN Xue<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Forestry Academy, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Zhifanggou small watershed on typical erosion environment is regarded as study plot to realize the effect of soil labile organic matter and carbon management index under erosion environment. We select slope cropland as contrast and analyze several indexes such as, soil total organic C (TOC), labile organic C (LOC), non-labile organic C (NLOC) and evolution characters of carbon management index. The study indicates that every group the content of soil carbon has been on the drastic increase after vegetation restoration. The increasing range of the content of TOC, LOC and NLOC is 109 % ~ 238 %, 194 % ~ 212 % and 65 % ~ 149 % respectively. The order of their increasing speed is NLOC > TOC > LOC. Moreover, the carbon index and carbon management index have been improved remarkably compared with slope cropland and the increasing range of them is 15 % ~ 659 % and 6.5 % ~ 414 % respectively. The soil management level and soil system have improved observably and developed towards better direction compared with the slope cropland. Moreover, correlation analysis shows that soil fertility factors has intimate relation to TOC, LOC, NLOC, carbon index and carbon management index. Five indexes are regarded as the index reflected the evolution of soil quality in the period of ecology restoration. The measures of vegetation restoration have enhanced the content of soil carbon and the management level of soil carbon while different measures have different effect on recovering. The order of recovering effect is mixed forest > pure forest > wasteland. Therefore the model that mixed forest is crucial and the pure forest is subsidiary should be adopted to promote ecology restoration.

**Key words:** erosion environment; vegetation restoration; soil active carbon; carbon management index

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中的恢复效果<sup>[1]</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, 可以灵敏反映不同农业生产措施对土壤碳库和潜在生产力的影响, 指示土壤有机质的早期变化<sup>[2-3]</sup>。黄土高原丘陵区是我国严重

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-03-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (90502007); 国家重点基础研究发展计划 (2007CB407205); 中科院科学院西部行动计划 (KZCX2-XB2-05)

作者简介: 戴全厚 (1969 - ), 男, 汉族, 陕西长武人, 副教授, 博士, 主要从事水土保持和生态恢复重建研究。E-mail: qhdai@foxmail.com

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-植物复合系统的功能改善以提高土壤质量。目前,对侵蚀环境下的植被恢复后土壤质量演变已有个别研究<sup>[4-6]</sup>,但大多集中于研究植被恢复后土壤理化性质的演变,而对该区域土壤碳库各组分及其碳库管理指数影响的相关报道甚少。因此该文以不同植被恢复模式恢复 30 a 后的土壤为研究对象,分析不同生态恢复过程对土壤活性有机碳及其管理指数的影响,揭示植被恢复与重建对改善土壤生态环境的作用机制,为黄土高原丘陵区土壤质量管理和山川秀美工程建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国科学院安塞水土保持试验站纸坊沟流域(E109°13'46"-109°16'03",N36°46'42"-36°46'28")位于陕西省安塞县,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发育而成的黄绵土为主,抗冲抗蚀能力差,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。该流域用于生态恢复定位试验研究,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,通过林草植被和工程建设等措施,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>[7]</sup>。

研究样地设在该流域的蟠龙山上,1975年在原坡耕地上开始植被恢复长期定位试验,建立了刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.,RP)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.,CA)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.,PT)3种纯林,油松-紫穗槐(*P. tabulaeformis*-*Amorpha fruticosa* Linn.,PA)与刺槐-紫穗槐(*R. pseudoacacia*-*A. fruticosa*,RA)2种混交林,同时还设有1个自然恢复的荒草地(Fallow land,FL)。

表 1 样地基本特征

样地	编号	地貌	坡向	坡度/(°)	海拔/m	土壤类型	林下草本类型
破耕地	CK	梁坡	N	22	1175	黄绵土	谷子
荒草地	FL	梁坡	N	20	1206	黄绵土	铁干蒿
刺槐林	RP	梁坡	NE10°	32	1129	黄绵土	胡枝子-长芒草
柠条林	CA	梁坡	N45°W	24	1029	黄绵土	铁干蒿-长芒草
油松林	PT	梁坡	N	27	1166	黄绵土	铁杆蒿-披针苔草
油松-紫穗槐	PA	梁坡	N	24	1142	黄绵土	铁干蒿-长芒草
刺槐-紫穗槐	RA	梁坡	N56°W	27	1185	黄绵土	铁干蒿

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和活性有机碳<sup>[8]</sup>。全氮(TN)用半微量凯氏法测定;pH(水土=2.5:1,pH计测定,日本产);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>[9-10]</sup>;非活性有机碳含量(NLOC)为总有机碳和活性有机碳含量之差。

土壤碳库管理指数计算方法如下,其中以破耕地土壤为参考土壤:

碳库指数(CPI)=样品全碳含量(mg/g)/参考土壤全碳含量(mg/g)

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 不同植被恢复方式对土壤碳库的影响

土壤作为一种独立的自然体,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。如表2所示,相对于破耕地不同植被恢复后土壤碳库各组分含量显著增加,其中总有机碳增幅达109%~238%,依次为刺槐-紫穗槐混交林>油松-紫穗槐混交林>荒草地>油松>刺槐>柠条;活性有机碳较恢复前增幅达194%~212%,依次为刺槐-紫穗槐混交林>油松-紫穗槐混交林>柠条>荒草地>油松>刺槐;非活性有机碳增幅为65%~149%,依次为刺槐-紫穗槐混交林>油松-紫穗槐混交林>油松>刺槐>柠条>荒草地。侵蚀环境下的破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,随着退耕后,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,死地被物积累与分解逐渐增多促使土壤碳库各组分含量增加,不同植被其生物特性不同,输入生态系统有机物质存在质和量的差异,进一步促使土壤碳库组分积累的差异性。苏静

等<sup>[11]</sup>研究认为植被恢复主要增加的是非活性有机碳含量,而 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。我们的研究发现不同模式植被恢复后,土壤活性和非活性有机碳都呈现出增加趋势,其中增加幅度非活性有机碳 > 有机碳 > 活性有机碳,表明在植被恢复过程中,土壤碳素中大多数以非活性形态作为潜在的物质源被贮存起来,另一方面又必须增加活性碳库含量来维持生物生长对速效基质的需求。

表 2 不同恢复模式对土壤活性有机碳及碳库管理指数演变

样地	有机碳/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	活性有机碳/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	非活性有机碳/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	碳库活度	碳库活度指数	碳库指数	碳库管理指数
CK	2.74 e	1.52 d	1.22 e	1.243	1.000	1.000	100.000
FL	6.59 bc	3.08 c	3.51 b	1.079	0.868	1.150	99.824
RP	5.94 d	2.95 c	2.99 c	0.865	0.696	1.531	106.560
CA	5.74 d	3.27 bc	2.47 d	1.092	0.878	2.352	206.600
PT	6.42 c	3.05 c	3.37 bc	1.059	0.852	2.443	208.118
PA	6.83 b	3.54 b	3.29 bc	1.326	1.067	2.093	223.280
RA	9.27 a	4.74 a	4.53 a	0.841	0.676	7.591	513.544

注:同一列中所带字母不相同,表明样地之间达到 1 % 的显著差异。

2.2 不同植被恢复方式对土壤碳库活度、管理指数的影响

土壤碳库活度是活性有机碳和非活性有机碳含量的比值,它和碳库活度指数都可以用来反映土壤碳素的活跃程度,活度越大,表示有机碳越易被微生物分解,质量也就越高。不同植被恢复模式恢复 30 a 后土壤碳库活度和碳库活度指数变化一致,除油松 - 紫穗槐混交林高于坡耕地外,均低于坡耕地,大小依次为油松 - 紫穗槐混交林 > 坡耕地 > 柠条 > 荒草地 > 油松 > 刺槐 > 刺槐 - 紫穗槐混交林(表 2),据此可以推测人工干扰较大的农田生态系统其碳素转化可能以高速低效率的运转状态来补偿人类对生态系统的胁迫,而在恢复后的半自然生态系统中减少了人为干扰,土壤碳素转化是以一种相对低速但高效率的模式进行,从而将更多的碳素以非活跃状态贮存下来。

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,能够反映土壤质量下降或更新的程

度<sup>[12-13]</sup>,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。其中碳库管理指数可以用来反映土壤经营和管理的科学性,其值升高,表明经营方式对土壤有培肥作用,土壤性能向良性发展;其值降低则表明土地经营措施使土壤肥力下降,土壤性质向恶性方向发展,即表明该措施是不科学的。如表 2 所示,不同植被恢复对土壤碳库管理指数影响较大;碳库指数较坡耕地明显增加,分别是坡耕地的 1.15 ~ 7.59 倍,大小依次为刺槐 - 紫穗槐混交林 > 油松 - 紫穗槐混交林 > 柠条 > 油松 > 刺槐 > 荒草地;碳库管理指数除荒草地和坡耕地差别不大外,其余均显著增加,增幅达到 6.5 % ~ 414 %,依次为刺槐 - 紫穗槐混交林 > 油松 - 紫穗槐混交林 > 油松 > 柠条 > 刺槐 > 荒草地。可见相对于人工干扰较多的坡耕地,不同植被恢复措施可以显著改善土壤经营和管理水平,土壤系统向着良性方向转变,其中改善措施以混交林最为明显,其次为纯林,最后为荒草地。

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 = 7)

R	TOC	LOC	NLOC	A	AI	CPI	CPMI	TN	Available N	TP	Available P	Available K
TOC	1.000	0.977 **	0.980 **	- 0.455	- 0.456	1.000 **	0.894 **	0.936 **	0.969 **	0.818 *	0.818 *	0.735
LOC		1.000	0.913 **	- 0.255	- 0.255	0.976 **	0.969 **	0.924 **	0.969 **	0.801 *	0.863 *	0.820 *
NLOC			1.000	- 0.622	- 0.623	0.980 **	0.786 *	0.908 **	0.929 **	0.799 *	0.741	0.625
A				1.000	1.000 **	- 0.455	- 0.011	- 0.418	- 0.330	- 0.412	- 0.087	0.065
AI					1.000	- 0.456	- 0.012	- 0.419	- 0.331	- 0.413	- 0.088	0.064
CPI						1.000	0.894 **	0.936 **	0.969 **	0.818 *	0.818 *	0.735
CPMI							1.000	0.859 *	0.915 **	0.725	0.868 *	0.874 *

注: \* 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)。

2.3 土壤活性有机碳、碳库管理指数与养分的耦合关系

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、全氮和碱解氮呈极显著相关,与全磷和速效磷显著相关,活性有机碳还与速效钾显著相关;碳库活度、活度指数和养分之间的相关性较弱,与各指标相关性并未达到显著水平;碳库指数、碳库管理指数除和有机碳等极显著相关外,还与全氮、碱解氮、全磷、速效磷

和速效钾相关性较强,分别达到显著或极显著水平。以上结果表明土壤碳库各组分含量、碳库指数和碳库管理指数与土壤养分关系及其密切,因此可以作为反映生态恢复过程土壤质量演变的指标。

3 结 论

(1) 侵蚀环境下的坡耕地植被恢复后土壤碳库各组分含量都得到显著改善,有机碳、活性有机碳和非活性有机碳含量增幅分别达 109 % ~ 238 %, 194 % ~ 212 % 和 65 % ~

149%, 增加速度非活性有机碳 > 有机碳 > 活性有机碳, 表明植被恢复过程中, 土壤碳素中大多数以非活性形态作为潜在的物质源被贮存起来。

(2) 开放的坡耕地农田生态系统土壤碳素可能以高速低效率的运转, 而植被恢复后土壤碳库活度和活度指数绝大多数呈降低趋势, 表明碳素转化变为一种相对低速但高效率的模式进行。植被恢复后, 碳库指数和碳库管理指数较坡耕地明显增加, 增幅分别达到 15% ~ 659% 和 6.5% ~ 414%, 说明土壤经营和管理水平较坡耕地得到了显著改善, 土壤系统向着良性方向转变。

(3) 相关性分析表明有机碳、活性有机碳、非活性有机碳、碳库指数、碳库管理指数与土壤主要肥力因子相关性及其密切, 可以作为反映生态恢复过程土壤质量演变的指标。

(4) 侵蚀环境下黄土丘陵区坡耕地土壤养分贫瘠, 不同植被恢复措施可以显著改善土壤碳库含量, 增加土壤碳库管理水平, 但改善作用不同, 总体来说混交林的效果最好, 其次为纯林, 最后为荒草地, 因此在该地区要通过人工促进生态恢复, 应以营造混交林为主, 纯林为辅的恢复模式, 来实现该区生态系统健康发展。

#### 参考文献:

- [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[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 68-70.
- [2] Blair J, Lefroy R D B, G Lisle L. Soil carbon fractions based on the in degree of oxidation and the development to carbon management index for agricultural systems[J]. Aust. J. Agric. Res., 1995, 46: 1459-1466.
- [3] 沈宏, 曹志红, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38.
- [4] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 93-96.
- [5] 焦峰, 温仲明, 焦菊英, 等. 黄土丘陵区退耕地土壤养分变异特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 724-730.
- [6] 王国梁, 刘国彬, 常欣, 等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 339-344.
- [7] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on Loess Plateau: challenge and prospective[J]. AM-BIO, 1999, 28(8): 663-668.
- [8] 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, 1999.
- [9] 徐明岗, 于荣, 王伯人. 土壤活性有机质的研究进展[J]. 土壤肥料, 2000(6): 3-7.
- [10] Hu S J, Van Bruggen A H C, Grunwald N J. Dynamics of bacterial population in relation to carbon availability in a residue amended soil[J]. Applied Soil Ecology, 1999, 13: 21-30.
- [11] 苏静, 赵世伟, 马继东, 等. 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 50-52.
- [12] 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 [J]. Australian J. of Soil Res., 1998, 36: 669-681.
- [13] Logninow W, Wisniewski W, Strong W M, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation [J]. Polish. J. of Soil Sci., 1987, 20: 47-52.

(上接第 60 页)

#### 参考文献:

- [1] 赵全, 赵新华, 董国凤, 等. 基于 GIS 的地下水环境安全评价模型[J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 98-101.
- [2] 吴凯, 许越先. 黄淮海平原水资源开发的环境效应及其调控对策[J]. 地理学报, 1997, 52(2): 114-122.
- [3] 王鹏飞, 李捷, 张杰. 深圳特区水资源的可持续利用[J]. 中国给水排水, 2002, 28(2): 21-23.
- [4] 黄钰铃, 惠二青, 员学锋, 等. 西南地区水资源可持续开发与利用[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(2): 46-49.
- [5] 阮本清, 王浩. 西线调水区水资源分析及可调水量商榷[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(1): 101-106.
- [6] 马斌, 解建仓, 阮本清, 等. 基于构件式的水资源调度管理模式及其应用研究[J]. 水利学报, 2000(12): 26-30.
- [7] 朱九龙, 陶晓燕, 王世军, 等. 淮河流域水资源价值测算与分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 126-131.
- [8] 沈珍瑶, 杨志峰. 黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 188-197.
- [9] Wang D Z, Hao Z Q, Xiong Z P. Modified method for extraction of watershed boundary with digital elevation modeling[J]. J. For. Res., 2004, 15: 283-286.
- [10] 丰华丽, 王超, 朱光灿. 土地利用变化对流域生态需水的影响分析[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 757-762.
- [11] 王芳, 王浩, 陈敏建, 等. 中国西北地区生态需水研究 (1) 基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 129-137.
- [12] 郑红星, 刘昌明. 黄河流域水资源演化模式分析[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 267-273.
- [13] WANG Dian-zhong, HAO Zhan-qing, XIONG Zai-ping. Modified method for extraction of watershed boundary with digital elevation modeling [J]. Journal of Forestry Research, 2004, 15(4): 283-286.
- [14] 穆兴民, 李靖, 王飞, 等. 基于水土保持的流域降水—径流统计模型及其应用[J]. 水利学报, 2004, 5(7): 122-128.