

侵蚀环境退耕撂荒地土壤活性有机碳与碳库管理指数演变

戴全厚^{1,2}, 刘国彬², 薛 蕙^{2,3}, 余 娜^{1,2}, 张 超², 兰 雪¹

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

摘 要: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撂荒地为研究对象,选取坡耕地和天然侧柏林为对照,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)及碳库管理指数的演变特征。结果表明:侵蚀环境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;撂荒后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 和 NLOC 分别较坡耕地增加 169%、144% 和 201%,为侧柏林的 35%、39%和 33%;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 169%和 117%,仅为侧柏林的 35%和 42%。表明坡耕地撂荒后,土壤碳库转化效率逐步提高,土壤管理经营更趋于健康科学,但相对于破坏前天然林水平还有很大的差距。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密切相关,可以作为反映生态恢复过程土壤质量演变的指标。

关键词:黄土丘陵区;退耕撂荒地;土壤活性碳库;碳库管理指数

中图分类号:S158.1 文献标识码:A 文章编号:1001-7461(2008)06-0024-05

Active Organic Matter and Carbon Pool Management Index of Soil at the Abandoned Cropland in Erosion Environment

DAI Quan-hou^{1,2}, LIU Guo-bin², XUE Sha^{2,3}, YU Na¹, ZHANG Chao², LAN Xue¹

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

Abstract: With Zhifanggou watershed under typical erosion environment as study plot, the abandoned in different time as subjects, and slope cropland and natural Chinese arborvitae stand as CK, the substitution method of space for time was applied to analyze organic carbon (OC), active organic carbon (AOC), non active organic carbon (NAOC) and evolvement of carbon pool management index in the period of ecological restoration. The result showed that the content of soil carbon indices on slope cropland were lower and increased dramatically in linear pattern after the cropland were abandoned for some time. 50 years after abandonment, OC, AOC and NAOC would increase by 169%, 144% and 210% respectively, compared to the slope cropland and would be 35%, 39% and 33% respectively, of the natural Chinese arborvitae stand. The carbon pool index and carbon pool management index would sharply increased by 169% and 117%, compared to the slope cropland would increase by 35% and 42% respectively, compared to natural Chinese arborvitae stand. The result indicated that conversion rate of soil carbon of cropland would increase after abandonment and the soil management was improved, though still far from the standards of natural forest before devastation. Correlation analysis showed that soil fertility was closely related to OC, AOC, NAOC,

(2) 收稿日期:2008-04-14 修回日期:2008-05-15
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);中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-05)
作者简介:戴全厚,男,副教授(贵州大学特聘教授,吉林省水保院特邀研究员),博士,主要从事水土保持和生态恢复重建研究。

carbon index and carbon management index. The five indices could be regarded as the indicators reflecting the evolvement of soil quality in the period of ecology restoration.

Key words: hilly loess plateau; abandon cropland; soil active carbon; carbon management index

侵蚀环境是指在水土流失区因侵蚀而造成的特有的侵蚀景观和生态系统^[1],是一个包含自然侵蚀环境与人文侵蚀环境的复合型环境系统。黄土丘陵区地形破碎,土壤结构疏松,自然植被遭到破坏,水土流失极为严重,属典型的侵蚀环境。严重的土壤侵蚀不仅危及当地的农业生产,破坏生态环境,而且还严重地威胁下游地区的河道安全。近年来,由于水土保持工作的开展和国家退耕还林还草政策的实施,不同立地条件下的大面积耕地退耕撂荒,使其自然恢复,形成了不同年限的撂荒植被。土壤有机碳是土壤的重要组成部分,是表征土壤肥力的重要参数,其指标已经被用来评价退化生态系统中的恢复效果^[2]。其中,具有移动快、稳定性差、易氧化、矿化的部分称为活性碳,它对植物养分供应有直接作用,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,指示土壤有机质的早期变化^[3-4]。许多研究证明,坡耕地撂荒后可以通过重建动植物物种来恢复土壤质量^[5],然而针对黄土丘陵区坡耕地撂荒后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。因此,以不同年限的撂荒地研究对象,分析植被恢复过程中土壤活性有机碳及其管理指数的演变过程,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 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞国家野外生态实验站

(109°13′46″~109°16′03″E, 36°46′42″~36°46′28″N),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。纸坊沟流域是中科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—990 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^[6]。

采用时空互代法在流域内长期监测的基础上选择土壤与成土母质类型相同、坡向坡位相似的 1(AF1)、5(AF 5)、7(AF7)、10(AF 10)、15(AF 15)、20(AF 20)、25(AF 25)、30(AF 30)、40(AF 40)、50 a(AF 50)撂荒草地为样地,选取坡耕地和天然次生侧柏(*Platycladus orientalis*)林为对对照样地,表 1 为样地概况。

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 mm 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^[7]。全氮(TN)用半微量凯氏法测定;pH(水:土=2.5:1)用 pH 计测定,日本产;土壤

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of the sample plots

样地	恢复年限/a	地貌	坡向	坡度/(°)	海拔/m	土壤类型	植被类型
CK	0	梁坡	N	22	1 175	黄绵土	谷子 <i>Setaria italic</i>
AF1	1	梁坡	ES18°	23	1 196	黄绵土	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>
AF5	5	梁坡	E	22	1 315	黄绵土	茵陈蒿 <i>A. capillaris</i>
AF7	7	梁坡	E	22	1 315	黄绵土	茵陈蒿 <i>A. capillaris</i>
AF10	10	梁坡	NW13°	23	1 316	黄绵土	茵陈蒿 <i>A. capillaris</i>
AF15	15	梁坡	NE38°	24	1 319	黄绵土	茵陈蒿 <i>A. capillaris</i>
AF20	20	梁坡	SE50°	28	1 270	黄绵土	铁杆蒿-胡枝子 <i>A. sacrorum-Lespedeza bicolor</i>
AF25	25	梁坡	NE40°	25	1 284	黄绵土	铁杆蒿-长芒草 <i>A. sacrorum-Stipa bungeana</i>
AF30	30	梁坡	SW18°	30	1 297	黄绵土	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>
AF40	40	梁坡	SE20°	18	1 286	黄绵土	铁杆蒿-长芒草 <i>A. sacrorum-S. bungeana</i>
AF50	50	梁坡	SE45	22	1 246	黄绵土	铁杆蒿-长芒草 <i>A. sacrorum-S. bungeana</i>
PO	—	梁坡	NW1°	33	1 283	黄绵土	侧柏林-披针苔 <i>Platycladus orientalis-Carex lanceolata</i>

全磷 (TP) 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)测定;速效磷 (AP)用 Olsen 法测定;速效钾 (AK)用乙酸铵提取-火焰光度法测定;总有机碳 (TOC)用重铬酸钾氧化外加热法测定;活性有机碳 (LOC)采用高锰酸钾氧化法^[8-9]测定;非活性有机碳含量 (NLOC)为总有机碳和活性有机碳含量之差。

计算土壤碳库管理指数,并以坡耕地土壤为参考土壤。

碳库指数(CPI) = 样品全碳含量(mg · g⁻¹)/参考土壤全碳含量(mg · g⁻¹) (1)

碳库活度(A) = 活性碳含量/非活性碳含量 (2)

碳库活度指数(AI) = 样品碳库活度/参考土壤碳库活度 (3)

碳库管理指数(CPMI) = 碳库指数×碳库活度指数×100=CPI×AI×100 (4)

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 撂荒对土壤有机碳、活性有机碳和非活性有机碳的影响

坡耕地撂荒后,土壤碳库各组分随恢复年限的增加变化显著(表 2)。有机碳在撂荒 5 a 时达到显著水平,50 a 较坡耕地增加 169%,为侧柏林的 35%;活性有机碳在撂荒当年有所降低,随后 25 a 波动较大,30 a 后开始显著增加,50 a 达到最大值,较坡耕地增加 144%,仅为侧柏林的 39%;非活性有机碳在撂荒当年显著增加,随后呈波动式增加,30 a 后增加显著,50 a 时较坡耕地增加 201%,为侧柏林的 33%。

2.2 撂荒对土壤碳库活度、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,质量越高。坡耕地撂荒后,土壤碳库活度和管理指数变化特征表明(表 2),土壤碳库活度在撂荒当年较坡耕地明显降低,随后随着撂荒年限的延长呈波动式缓慢上升,但始终低于坡耕地水平,撂荒 30 a 时开始高出侧柏林。碳库指数和碳库管理指数是系统、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^[10-11]。碳库指数在撂荒当年明显降低,随后缓慢增加,50 a 时达到最大值,为坡耕地的 2.69 倍,为侧柏林的 35%;碳库管理指数撂荒后显著降低,随之逐渐增加,30 a 时超过坡耕地水平,并随恢复年限延长继续增加,50 a 时达最大值,较坡耕地高 117%,为侧柏林的 42%。

表 2 坡耕地撂荒不同年限土壤活性有机碳及碳库管理指数演变^①
Table 2 Active organic matter and carbon pool management index of soil at different periods of abandonment

样地	有机碳 /(mg · kg ⁻¹)	活性有机碳 /(mg · kg ⁻¹)	非活性有机碳 /(mg · kg ⁻¹)	碳库活度	碳库活度指数	碳库指数	碳库管理指数
CK	2.74 i	1.52 fg	1.22 i	1.243	1.000	1.000	100.000
AF1	2.56 ih	1.10 h	1.45 hi	0.760	0.611	0.934	57.085
AF5	3.59 g	1.51 fg	2.08 ef	0.725	0.583	1.309	76.342
AF7	2.95 h	1.39 g	1.55 h	0.898	0.722	1.075	77.620
AF10	4.36 e	1.96 e	2.39 d	0.821	0.660	1.590	104.926
AF15	3.48 g	1.54 fg	1.93 fg	0.796	0.640	1.268	81.232
AF20	4.02 f	1.70 f	2.32 de	0.733	0.590	1.466	86.408
AF25	3.39 g	1.57 fg	1.83 g	0.856	0.688	1.238	85.258
AF30	5.04 d	2.69 d	2.35 d	1.141	0.918	1.839	168.785
AF40	6.13 c	3.09 c	3.04 c	1.015	0.816	2.239	182.707
AF50	7.38 b	3.70 b	3.68 b	1.006	0.809	2.692	217.704
PO	20.80 a	9.50 a	11.30 a	0.841	0.676	7.591	513.544

①同列不同字母表示样地之间达到 1% 的显著差异。

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)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、速效磷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,仅与全磷含量显著相关;碳库指数、碳库管理指数除和有机碳组分等极显著相关外,还与全氮、碱解氮、速效磷、速效钾极显著相关。因此,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

肥力因子关系最为密切, 可以作为反映生态恢复过程的监测因子。

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($n=10$)^①

Table 3 Correlation coefficient between active organic matter, carbon management index and nutritional factors($n=10$)

	TOC	LOC	NLOC	A	AI	CPI	CPMI	TN	AN	TP	AP	AK
TOC	1.000	0.997**	0.998**	-0.033	-0.033	1.000**	0.987**	0.990**	0.975**	0.414	0.766**	0.917**
LOC		1.000	0.989**	0.042	0.041	0.997**	0.997**	0.992**	0.973**	0.354	0.751**	0.924**
NLOC			1.000	-0.095	-0.096	0.998**	0.973**	0.983**	0.972**	0.462	0.775**	0.906**
A				1.000	1.000**	-0.033	0.119	0.002	-0.068	-0.577*	-0.306	0.043
AI					1.000	-0.033	0.118	0.002	-0.068	-0.576*	-0.306	0.043
CPI						1.000	0.987**	0.990**	0.976**	0.414	0.766**	0.917**
CPMI							1.000	0.988**	0.965**	0.295	0.729**	0.925**

① * 表示差异达显著水平($P<0.05$), ** 表示差异达极显著水平($P<0.01$)。下表同。

2.4 土壤活性有机碳、碳库管理指数与恢复年限的耦合关系

对撂荒地土壤有机碳、管理指数等与恢复年限的关系进行耦合分析, 结果(表 4)表明, 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随恢复年限呈线性增长, 相关系数最小为 0.878 0, 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、非活性有机碳的年增长量分别为 0.084、0.045、0.039 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碳库指数和碳库管理指数年增长量分别为 0.031 和 2.807, 据此估算, 该区坡耕地土壤有机碳等属性指

标要想恢复到破坏前天然林水平, 需要 161.3~254.4 a, 其中以碳库管理指数和活性有机碳恢复所需年限最短, 而非活性有机碳最长。当然, 这只是一理想状态下的推算, 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, 往往在恢复到一定阶段, 由于各种环境条件制约, 此过程逐步趋近于稳定的亚顶级群落, 对土壤的改善作用也趋于稳定, 也就是说, 单纯依靠次生演替生物的自肥能力是很难实现土壤质量的彻底恢复, 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, 加速促进生态恢复的进程。

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 active organic matter, carbon management index and years of restoration

土壤属性	回归方程	相关系数	估算年限 /a
有机碳(TOC)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=0.084\ 1x+2.595\ 0$	$r=0.917\ 8^{**}$	216.5
活性有机碳(LOC)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=0.045\ 4x+1.140\ 9$	$r=0.909\ 8^{**}$	184.2
非活性有机碳(NLOC)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=0.038\ 7x+1.454\ 1$	$r=0.886\ 0^{**}$	254.4
碳库指数(CPI)	$y=0.030\ 7x+0.947\ 0$	$r=0.917\ 8^{**}$	216.4
碳库管理指数(CPMI)	$y=2.806\ 8x+60.754\ 0$	$r=0.878\ 0^{**}$	161.3

3 结论与讨论

土壤对水、肥、气、热及根系生长空间具有调节功能, 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为干扰, 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封闭或半封闭自然生态系统的物质循环结构, 大量的枯落物重新返回到生态系统中, 并随着恢复演替的进行, 死地被物积累与分解逐渐增多, 促使土壤有机碳各组分显著增加, 但由于前期植物物种处于快速演变过程, 导致前期增加幅度波动较大, 随后植被趋于稳定, 碳素含量逐渐稳步增加。Blair 等^[3]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^[12]研究认为植被恢复主要增加的是非活性有机碳含量。本研究表明, 随着植被恢复, 不同组分增加速度不同, 其中有机碳增速最大, 活性有机碳和非活性有机碳增速差

异不大。活性有机碳占有有机碳的 42%~55%, 在恢复过程中变化不大。说明在植被恢复过程中, 植物虽然不断地向土壤中输入碳源, 但是其自身生长又不断增大对养分的需求, 从而使土壤碳素转化始终处于一个动态平衡中。

坡耕地碳库活度和活度指数显著高于撂荒地。人工干扰较大的农田生态系统和干扰相对较少的半自然生态系统中, 碳素转化是 2 种不同的运转模式, 其中农田系统土壤碳素可能长期维持在一定的高速运转状态来补偿人类对土壤的干扰, 而这种高速却是以一种低效率的形式来完成, 久而久之, 土壤处于一种亏却状态, 土壤质量降低。退耕后人类干扰相对减少, 碳素转化效率逐步提高, 碳库活度和活度指数逐渐增大。

碳库指数和碳库管理指数可以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。其中碳库管理指数常被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。坡耕地土壤侵蚀严重,处于超负荷运转状态,质量趋于恶化。撂荒后,随着人类对土壤的掠夺逐渐减少,土壤得到休养生息,质量向着良性方向发展,也就是说,土壤经营和管理更趋于科学化,但和该区域破坏前的天然植被相比,碳库指数和碳库管理指数还有较大的差距,表明植被恢复虽然可以恢复土壤碳库含量,提高土壤经营科学性,但是此过程要漫长和曲折的多。

综上所述,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。撂荒后,随着归还物质的增多,碳库各组分均显著增加,其中活性有机碳增速和非活性有机碳差异不大,随着植被恢复,土壤碳库活度呈缓慢增加趋势,碳素转化效率逐步提高,土壤管理经营更趋于健康科学。但和天然林相比差距较大,表明依靠生物的自肥能力可以提高土壤的管理水平,但此阶段是一个长期的过程;另一方面,由于演替推动力的作用,此过程也可能会出现反复,因此,必须从植被建设和土地经营角度来促进植物群落的拓殖与更替,加速该区生态系统健康持久地发展。

参考文献:

[1] 戴全厚,刘国彬,薛莲,等. 侵蚀退耕撂荒地水稳性团聚体演变特征及土壤养分效应[J]. 水土保持学报,2007,21(2):61-64,77.

[2] 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.

[3] 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[J]. Aust. J. Agric. Res., 1995,46:1459-1466.

[4] 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.

[5] 戴全厚,刘国彬,薛莲,等. 侵蚀环境退耕撂荒地水稳性团聚体演变特征及与土壤养分效应[J]. 水土保持学报,2007,21(2):61-64.

[6] LIU G B. Soil conservation and sustainable agriculture on Loess Plateau: challenge and prospective[J]. AMBIO, 1999,28(8):663-668.

[7] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,1999.

[8] 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.

[9] HU S J, VAN BRUGGEN A H C, Grünwaldb N J. Dynamics of bacterial population in relation to carbon availability in a residue amended soil[J]. Applied Soil Ecology,1999,13:21-30.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.