

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

戴全厚^{1,2}, 刘国彬², 薛 蕙^{2,3}, 余 娜^{1,2}, 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 杨凌 712100; 3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘 要: 采用时空互代法, 在典型侵蚀环境纸坊沟流域内选取营造果园和修建梯田两种坡耕地改造模式的土壤样品为研究对象, 以坡耕地为参照, 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)及碳库管理指数的演变特征。结果表明, 坡耕地改造为梯田后, 土壤碳库各组分随改造年限显著增加。碳库指数(CPI)和碳库管理指数(CPMI)总体呈现逐渐增加趋势。改造为果园后, TOC、LOC 和 NLOC 表现规律不一, 但总体呈现波动式上升。CPI 和 CPMI 随年限波动式上升, 其后 CPI 逐渐趋于稳定, 而 CPMI 开始缓慢回落, 30 a 时仍较坡耕地增加。研究表明, 通过工程和营造果园可以提高土壤碳库各组分含量, 使土壤经营和管理趋于科学化, 土壤质量向良性发展。相关性分析说明有机碳、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极其密切, 可以作为反映坡耕地改造过程中土壤质量评价的指标。

关键词: 黄土丘陵区; 坡耕地改造; 土壤活性碳库; 碳库管理指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)04-0017-05

中图分类号: S153.6⁺1

Impacts of Slope Cropland Rebuilding on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in the Eroded Hilly Loess Plateau

DAI Quanhou^{1,2}, LIU Guobin², XUE Sha^{2,3}, YU Na¹, LAN Xue¹

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

Abstract: Zhifanggou watershed of typical erosion environment was regarded as a study area and the soil samples of planting orchard and building terrace were viewed as the objects. The interchangeable space-time method was adopted and a slope cropland was selected as a contrast. Several indexes were analyzed such as TOC, LOC, NLOC, and the evolution characteristics of carbon management index in the period of ecological restoration. The study indicates that the content of soil carbon for each group of soil samples was increased drastically with the increase in the time of conservation by building terrace. The carbon index and the carbon management index were increased steadily. The increasing range of the carbon index tended to balance and the carbon management index was declined gradually. Apparently, the content of soil carbon for each group of soil samples is increased by planting orchard. Soil management has been improved and soil quality has developed in a sound way. Moreover, correlation analysis shows that soil fertility factors have intimate relations to TOC, LOC, NLOC, carbon index, and carbon management index. The five indexes may be regarded as the indexes reflecting the evolution of soil quality in the period of ecological restoration.

Keywords: hilly loess plateau; rebuilding of slop cropland; soil labile carbon; carbon management index

黄土高原是世界上严重的生态脆弱区, 长期以来由于滥垦、滥伐和滥牧, 造成该区域坡耕地大量增加, 而这种不合理的生态经营方式又进一步导致该地区

生态系统的进一步恶化。目前, 全区坡度大于 7° 的耕地占全区耕地总面积 49.24%, 主要分布在黄土丘陵区, 是水土流失的重点区域。对坡耕地进行改造,

收稿日期: 2008-01-08

修回日期: 2008-04-20

资助项目: 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); 中国科学院科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-05)资助

作者简介: 戴全厚(1969-), 男(汉族), 陕西省长武县人, 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.

实现经济与生态的协调健康发展,是有效保持水土,减少土壤侵蚀的重要途径。土壤碳库容量与土壤管理水平、作物营养关系密切,可以作为评价土壤质量的一个重要指标^[1]。土壤碳库中具有移动快,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,指示土壤有机质的早期变化^[2-3]。研究已经证明坡耕地可以导致土壤有机碳流失,而退耕可以提高土壤碳含量^[4-5]。目前针对黄土丘陵区坡耕地改造中土壤活性有机碳及其管理指数演变规律的研究相对较少,因此本文以坡耕地改造为梯田和果园两种改造方式的不同年限样地为研究对象,分析改造过程中土壤活性有机碳及其管理指数的演变过程,揭示坡耕地改造对改善土壤生态环境的作用机制,为水土保持效益评价、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县纸坊沟流域(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—1990年)和良性生态初步形成期(1991年至今)。经过30 a多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,使林地面积从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选择营造和管理方法一致,土壤与成土母质类型相同,不同年限的梯田1 a(Te1),8 a(Te8),20 a(Te20),30 a(Te30)和果园2 a(Or2),5 a(Or5),7 a(Or7),10 a(Or10),15 a(Or15),20 a(Or20),30 a(Or20)为样地,选取坡耕地(Sloping Cropland, SL)为对照样地(如表1)。

表1 样地基本特征

改造方式	样地	改造年限/a	地貌	坡度/(°)	海拔/m	土壤类型	作物
改造为梯田	SL	0	梁坡	N	1 175	黄绵土	谷子
	Te1	1	—	—	1 161	黄绵土	玉米
	Te8	8	—	—	1 149	黄绵土	玉米
	Te20	20	—	—	1 153	黄绵土	玉米
	Te30	30	—	—	1 148	黄绵土	玉米
营造果园	SL	0	梁坡	N	1 175	黄绵土	谷子
	Or2	2	梁坡	S 20° E	1 121	黄绵土	苹果
	Or5	5	梁坡	S 25° E	1 128	黄绵土	苹果
	Or7	7	梁坡	S 20° E	1 142	黄绵土	山杏
	Or10	10	梁坡	S	1 168	黄绵土	苹果
	Or15	15	坡顶	—	1 142	黄绵土	苹果
	Or20	20	坡顶	—	1 150	黄绵土	苹果
	Or30	30	坡顶	—	1 143	黄绵土	苹果

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]。全氮采用半微量凯氏法测定;pH采用pH计测定;土壤全磷采用碳酸钠熔融—钼锑抗比色法;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;活性有机碳采用高锰酸钾氧化法^[8-9];非活性有机碳含量为

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,其中以坡耕地土壤为参考土壤^[10]。

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 坡耕地改造为梯田对土壤碳库组分和管理指数的影响

坡耕地被改造为梯田后, 土壤碳库组分含量变化规律明显(表 2)。土壤有机碳在改造第 1 a 就显著提高, 修建 30 a 的梯田较坡耕地增加 146%, 活性有机碳含量在改造梯田前 8 a 变化较为剧烈, 随后逐渐上

升, 30 a 时达到最大值, 高出坡耕地 196%; 非活性有机碳在改造为梯田后每 10 a 增幅就达到一次显著水平, 30 a 为坡耕地的 2 倍。有机碳增加速率最大, 其次是活性有机碳。活性有机碳占有机碳含量的 45.50%~58.07%, 变异系数为 11.05。

从表 2 还可以看出, 土壤碳库活度和碳库活度指数在改造为梯田当年增加明显, 随后迅速降低, 8 a 时达到低谷。接着, 随利用年限的延长, 缓慢上升, 30 a 时较坡耕地增加 48%。碳库指数随着改造年限延长逐渐增加, 30 a 时高出坡耕地 146%, 碳库管理指数与碳库活度相似, 当年显著增加, 随后显著降低, 8 a 时达到低谷, 之后持续上升, 30 a 时较坡耕地增加 265%。

表 2 坡耕地改造为梯田对土壤碳库组分及碳库管理指数的影响

样地编号	改造年限/a	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 (A)	碳库活度指数 (AI)	碳库指数 (CPI)	碳库管理指数 (CPMI)
SL	0	2.50D	1.21D	1.29C	0.94	1.00	1.00	100.00
Te1	1	3.11C	1.80C	1.30C	1.38	1.47	1.24	182.85
Te8	8	3.28C	1.49CD	1.79B	0.83	0.89	1.31	116.22
Te20	20	5.08B	2.56B	2.52A	1.02	1.08	2.03	219.67
Te30	30	6.16A	3.59A	2.58A	1.39	1.48	2.46	364.94

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 坡耕地改造为果园对土壤碳库组分和管理指数的影响

如表 3 所示, 人工种植果树后土壤有机碳在前 10 a 波动式上升, 增长较为缓慢, 随后增长加速, 15~30 a 基本趋于稳定, 30 a 时较坡耕地增加了 97%; 活性有机碳在栽植 2 a 即到达显著水平, 2~10 a 处于稳定期, 随后开始缓慢上升, 15~30 a 又趋于稳定, 30 a 时较坡耕地增加 104%; 非活性有机碳在前 10 a 变化较为剧烈, 并未有显著增加, 甚至有所降低, 15 a

后才开始迅速增加, 20~30 a 时趋于稳定, 30 a 为坡耕地的 1.92 倍。3 个组分以有机碳含量增幅最大, 活性有机碳增幅略低于非活性有机碳。总体来说, 土壤碳库活度和碳库活度指数在栽植前 10 a 逐渐增大, 随后开始回落, 30 a 时略高于坡耕地。土壤碳库指数随着栽植年限延长呈波动式上升, 并逐渐趋于稳定, 同样碳库管理指数在种植前 15 a 波动上升, 15 a 时是坡耕地的 2.91 倍, 随后开始缓慢回落, 30 a 时仍较坡耕地增加 110%。

表 3 坡耕地改造为果园对土壤碳库组分及碳库管理指数的影响

样地编号	改造年限/a	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
SL	0	2.50de	1.21c	1.29c	0.94	1.00	1.00	100.00
Or2	2	3.13c	1.61b	1.52c	1.06	1.13	1.25	140.91
Or5	5	2.32e	1.59b	0.74d	2.16	2.29	0.93	213.22
Or7	7	3.15d	1.64b	1.52c	1.08	1.15	1.26	144.57
Or10	10	2.72c	1.89b	0.84d	2.26	2.41	1.09	262.02
Or15	15	4.75b	2.81a	1.94b	1.44	1.54	1.90	291.79
Or20	20	5.07a	2.61a	2.46a	1.06	1.13	2.03	229.41
Or30	30	4.96ab	2.48a	2.48a	1.00	1.06	1.98	210.47

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。

2.3 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 4), 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、全磷、速效磷和速效钾呈显著或极显著相关; 碳库活度、活度指数和养分之间的相关性较弱, 仅和非活性有机碳含量显著相关; 碳库指数与有机碳组分和土壤主要肥力指标均显著或极显著相关, 碳库管理指数除和有机碳、活性有机碳、全氮和速效钾相关性显著或极显著。

表 4 土壤活性有机碳、碳库管理指数与养分因子相关性分析

R	有机碳	活性有机碳	非活性有机碳	碳库活度	碳库指数	碳库管理指数	全氮	碱解氮	全磷	速效磷	速效钾	
TOC	1.000	0.941**	0.934**	-0.311	-0.311	1.000**	0.676*	0.979**	0.834**	0.700*	0.810**	0.796**
LOC		1.000	0.758**	0.008	0.009	0.941**	0.883**	0.913**	0.792**	0.578*	0.680*	0.829**
NLOC			1.000	-0.605*	-0.606*	0.934**	0.372	0.923**	0.774**	0.736**	0.841**	0.661*
A				1.000	1.000**	-0.309	0.468	-0.318	-0.172	-0.440	-0.392	0.028
AI					1.000	-0.309	0.469	-0.318	-0.174	-0.439	-0.391	0.029
CPI						1.000	0.677	0.979**	0.834**	0.699*	0.810**	0.797**
CPMI							1.000	0.650*	0.598	0.314	0.402	0.731**

注: * 表示差异达显著水平($p < 0.05$); ** 表示差异达极显著水平($p < 0.01$)。

2.4 土壤活性有机碳、碳库管理指数与恢复年限的耦合关系

对两种改造方式土壤有机碳、管理指数等随改造年限进行耦合分析, 结果如表 5 所示。坡耕地改造为梯田后, 土壤有机碳、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, 年增长率分别为 0.117, 0.070, 0.047 和 0.047 g/kg, 其中活性有机碳

增长速率高于非活性有机碳; 营造果园后土壤有机碳、活性有机碳、非活性有机碳和碳库指数随年限呈一次线性关系, 年增长率分别为 0.098 7, 0.047 8, 0.050 8和 0.039 4 g/kg。

非活性有机碳增加速率略大于活性有机碳, 碳库管理指数呈极显著二次函数增长, 相关系数为 0.860, 具有很好的统计学意义。

表 5 土壤碳库组分、管理指数与恢复年限的耦合分析

改造方式	土壤属性	回归方程	相关系数
改造为梯田	有机碳/(mg·kg ⁻¹)	$y = 0.1169x + 2.6460$	$r = 0.987**$
	活性有机碳/(mg·kg ⁻¹)	$y = 0.0701x + 1.3046$	$r = 0.946*$
	非活性有机碳/(mg·kg ⁻¹)	$y = 0.0471x + 1.3392$	$r = 0.967**$
	碳库指数	$y = 0.0468x + 1.0566$	$r = 0.987**$
营造果园	有机碳/(mg·kg ⁻¹)	$y = 0.0987x + 2.4766$	$r = 0.861**$
	活性有机碳/(mg·kg ⁻¹)	$y = 0.0478x + 1.4483$	$r = 0.833**$
	非活性有机碳/(mg·kg ⁻¹)	$y = 0.0508x + 1.0327$	$r = 0.774*$
	碳库指数	$y = 0.0394x + 0.9916$	$r = 0.861**$
	碳库指数	$y = -0.4744x^2 + 17.48x + 105.6$	$r = 0.860**$

注: * 表示差异达显著水平($p < 0.05$); ** 表示差异达极显著水平($p < 0.01$)。

3 结论

土地利用方式的变化导致土壤对水、肥、气、热及根系生长空间具有调节功能差异化, 进一步可使土壤性质发生显著改变, 其中有机碳库的变化是最重要的

表现之一。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。通过工程措施营造梯田后, 有效地控制了水土流失, 加之农业经营活动的集约化, 土壤有机质逐渐显著增加。坡耕地改造为果园初期, 管理经营措施加大, 但是林

冠并未愈合, 林下草本较多, 土壤处于一个相对封闭的系统中, 碳库各组分含量随着栽植年限显著增加。到了产果期, 在人为和生物竞争作用下的林下草本逐渐减少, 整个系统呈开放性, 碳库增长减缓, 这种增长是建立在高投入高产出的基础上, 土壤碳库各组分含量处于动态平衡状态。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^[11] 研究认为植被恢复主要增加的是非活性有机碳含量。我们的研究表明两种改造方式中土壤活性有机碳和非活性有机碳均呈现增加趋势, 活性有机碳占有有机碳的 45.50% ~ 69.35%, 说明侵蚀环境下的农田生态系统土壤碳库含量水平较低。为了达到碳库的相对平衡, 必须维持一个高的活性比例, 来实现碳素的快速运转。

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^[12]。对坡耕地改造后土壤碳库活度和活度指数变化规律相对复杂, 但总体来说不低于坡耕地水平, 表明坡耕地改造后土壤活跃度增大, 质量得到提高。相关性分析表明土壤活度和活度指数与土壤肥力因子关系较弱, 且与改造年限规律较弱, 因此是否可以用碳库活度和活度指数来评价土壤质量, 还有待进一步研究。

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^[1, 13], 能够反映土壤质量下降或更新的程度^[14-15], 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。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。坡耕地土壤侵蚀严重, 处于超负荷运转状态, 质量趋于恶化, 改造为梯田后, 土壤立地条件得到改善, 土壤经营和管理更趋于科学化, 碳库指数和管理指数得到显著提高。而营造果园后, 随着林木生长, 土壤碳库指数和管理指数逐渐增加, 林木生长达到旺盛期, 产果量增加, 人工管理措施加大, 碳库指数和管理指数达到顶峰, 林木中后期, 由于生长减弱, 病虫害加重, 导致碳库管理指数略有降低。

综上所述, 侵蚀环境下的坡耕地土壤碳库各组分含量和活度较低, 通过工程改造为梯田或营造果园后, 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显著增加, 并随改造年限呈线性变化, 碳库活度和活度指数变化规律较弱, 表明坡耕地改造后, 土壤碳库含量得到改善, 土壤经营和管理趋

于科学化, 土壤质量向良性发展。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极其密切, 并随改造年限变化明显, 可以作为反映改造过程土壤质量演变的指标因子。

[参 考 文 献]

- [1] 沈宏, 曹志红. 不同农田系统土壤碳库管理指数的研究 [J]. 生态学报, 2000, 20(4): 663—668.
- [2] Blair J, Lefroy R D B, G Lisle L. Soil carbon fractions based on their 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] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡地黑土有机碳分布特征与土壤碳损失量计算 [J]. 中国环境科学, 2005, 25(6): 81—84.
- [5] 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 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 78—80.
- [6] Liu Guobin. Soil conservation and sustainable agriculture on Loess Plateau: challenge and prospective [J]. AM-BIO, 1999, 28(8): 663—668.
- [7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 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, 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.
- [10] 沈宏, 曹志红. 施肥对土壤不同形态及碳库管理指数的影响 [J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 166—173.
- [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] 张付申. 长期施肥条件下黄土和黄绵土有机质氧化稳定的研究 [J]. 土壤肥料, 1996(6): 32—41.
- [13] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 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 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459—465.
- [14] 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.
- [15] 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.