

等高反坡阶对坡耕地土壤碳库的影响

陈敏全, 王克勤

(西南林业大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: [目的] 研究坡耕地等高反坡阶措施的蓄水保土和固碳减排效应, 为改善云南山区红壤坡耕地土壤侵蚀状况提供科学依据。[方法] 自然降雨条件下, 通过松花坝迳者小流域 1 a 的野外径流小区定位观测, 对有、无等高反坡阶措施条件下的坡面产流产沙和土壤有机碳流失进行对比分析。[结果] (1) 泥沙作为土壤有机碳流失的重要载体, 因其流失所致的流失量占总有机碳流失量的 85% 以上, 最高达 95.38%; (2) 等高反坡阶具有显著的蓄水减流和保土减沙效应, 其减流率在 5.56%~53.91%, 减沙率在 18.84%~83.11%, 产沙调控作用更优; (3) 雨季前后, 原状坡面小区土壤碳储量减少率达 9.90%, 明显高于等高反坡阶小区土壤碳储量的减少率 3.99%; (4) 通过相关分析发现, 2 个小区土壤有机碳的流失率与降雨量均未达到显著相关, 但与降雨侵蚀力显著相关 ($p < 0.05$)。径流、泥沙与 2 个小区有机碳的流失率均达到了显著正相关 ($p < 0.05$)。[结论] 等高反坡阶通过改变地表微地形, 减少了坡耕地有机碳的输出。

关键词: 坡耕地; 等高反坡阶; 径流; 泥沙; 土壤碳库

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0041-06

中图分类号: S157.9

Effects of Reverse-slope Level Terrace on Soil Carbon Stock of Sloping Farmland

CHEN Minquan, WANG Keqin

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: [Objective] In order to provide a scientific basis for prevention of soil erosion on slope farmlands in mountainous area of Yunnan Province, the effects of reverse-slope level terraces on soil and water conservation and soil carbon stock of slope farmland were studied. [Methods] A comparative experiment was conducted in a fixed 1 year run-off observation plot located in Yizhe watershed of Kunming Songhuaba reservoir under natural rainfall condition. Surface runoff, sediment quantity and the loss of soil organic carbon from slope farmland with and without reverse-slope level terraces (act as control) were measured. [Results] (1) As an important carrier of soil organic carbon, the loss of sediment-bonded soil organic carbon accounted for over 85% of the total organic carbon lost with runoff, and the maximum bonded loss proportion could reach 95.38%. (2) The reverse-slope level terrace performed significant effects on promoting soil and water conservation and on reducing runoff and sediment. The reduction rates of runoff and sediment by the reverse-slope level terrace were 5.56%~53.91% and 18.84%~83.11%, respectively, showing that the sediment reducing effect of reverse-slope level terrace was more prominent than that of carbon reducing effect. (3) The reduction rate of soil carbon storage of slope farmland with reverse-slope level terrace was 3.99% during the rainy season, which was significantly less than that of the control of 9.90% reduction. (4) Correlation analysis by the observations from treatment with reverse-slope level terrace and the control showed that the loss rate of soil organic carbon from slope farmland was not significantly correlated with rainfall, it was significantly correlated with erosion capacity of the rainfall ($p < 0.05$). The runoff and sediment quantities were significantly and positively correlated with the loss rate of soil organic carbon in both of the two observation plots ($p < 0.05$). [Conclusion] Mainly by changing micro-topography of land surface, reverse-slope level ter-

收稿日期: 2015-09-06

修回日期: 2015-09-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“微区域集水系统控制云南山区农业面源污染的机理研究”(30660037); 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目

第一作者: 陈敏全(1988—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持生态修复研究。E-mail: chenminquan512@163.com。

通信作者: 王克勤(1964—), 男(汉族), 甘肃省庄浪县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事山区小流域环境综合治理的理论与技术研究。E-mail: wangkeqin7389@sina.com。

race had remarkable effect on reducing the output of soil organic carbon from slope farmland.

Keywords: sloping farmland; reverse-slop level terrace; runoff; sediments; soil carbon stock

土壤侵蚀作为当今全球范围最为严重的生态环境问题之一,对土地质量、作物生产力和生态环境质量造成了极大威胁^[1]。坡耕地是中国耕地资源的重要组成部分,同时也是江河泥沙的主要来源。坡耕地土壤侵蚀很大程度上改变了土壤的结构和生物化学性质,减少了可耕种土地资源,并引起土壤有机碳库流失,降低土地生产力^[2-3]。水土流失治理措施的实施可显著改善土壤质量,据 Lal^[4-5] 研究估计,全球水土流失治理的固碳潜力为 1.47~3.04 Pg/a。土壤有机碳含量的维持与恢复不仅有利于改善土壤肥力状况且对维护生态系统的结构与功能具有重要意义。因此,了解坡耕地水土流失措施实施条件下土壤有机碳库的变化及其影响,对科学评价坡耕地水土流失区土壤碳库及碳循环具有重要意义。近年来,由于全球变暖使厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)引起的干旱现象更加频繁^[6],致使中国以坡耕地为主要耕地的云南山区降水资源缺乏,且分布不均,造成该区粮食产量下降。同时,由于长期不合理利用,土壤侵蚀严重,造成水土流失,生态环境不断恶化,严重制约着当地农业的发展。水平阶作为坡耕地水土保持措施之一,在干旱地区坡面整地和植被恢复中得到广泛运用,且保水保土效果显著^[7-8]。但从小流域角度,研究等高反坡阶措施对坡耕地侵蚀土壤碳库影响的报道不多。因此,从等高反坡阶治理措施角度研究迤者小流域土壤有机碳(SOC)的变化规律,为研究侵蚀条件下的土壤碳的迁移、转化规律提供理论依据,也为改善云南山区红壤坡耕地土壤侵蚀状况提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

松华坝水库水源保护区位于迤者小流域,地处云南省昆明市东北部,位于北纬 25°12'48"—24°14'43",东经 102°44'51"—102°48'37",为滇池水系盘龙江一级支流源头区,海拔 2 010~2 589.5 m,属于低纬度高原山地季风气候。研究区年降水量 785.1 mm,干

湿季分明,雨季(5—10月)降雨量占全年降雨量的 87.5%,暴雨基本出现在雨季。区域内土壤为地带性粘性红壤,偏酸性,流域总面积 21.56 km²,坡耕地 2.84 km²,占耕地面积的 55.8%,主要种植烤烟、大豆、玉米、马铃薯等。小流域地貌类型以高原低山为主,水土流失严重,河道含沙量大,对松花坝水源质量造成严重影响。

1.2 试验设计

根据松华坝水源区迤者小流域地形条件在同一坡面上修筑径流小区。设计径流小区坡度为 15°,投影面积为 5 m×20 m,坡向南北。小区上方设截水沟,下部连接 2 m×1 m×2 m 的集流池,用于小区内地表径流和泥沙的收集。径流泥沙采用 5 分法进行收集(4/5 排出集流池外,1/5 在集流池中进行取样)。在每个径流小区安装了 WGZ-1 型数字水位计(重庆水文仪器厂生产),观测径流量以及产流过程,并在径流小区内布设自计雨量计,监测降雨量和降雨强度。试验共设 2 个处理:常规顺坡耕作(T₁);顺坡耕作+等高反坡阶(T₂),等高反坡阶沿等高线自上而下里切外垫,修成一台面,台面外高里低,宽 1.2 m,反坡 5°,以尽量蓄水,减少流失。每个处理 3 个重复,随机区组排列,其中,T₁ 为对照处理。径流泥沙的观测时间为 2013 年 1 月至 2013 年 12 月,对次降雨下的各小区径流量和侵蚀泥沙量进行统计。土壤取样时间为 2013 年 4 月和 2013 年 10 月,分别在当年雨季之前和雨季结束后进行土壤样品的采集,各小区按 S 形取 5 个点,每个点取表层(0—20 cm)土壤 300 g,用四分法取混合土样装袋密封,带回实验室内供土壤指标分析。

1.3 测定方法

(1) 降雨量的测定。采用 JDZ-1 型数字自记雨量计自行测定。

降雨侵蚀力则根据自计雨量记录结果求出 30 min 最大雨强(I₃₀),由 Wischmeier 等^[9]降雨侵蚀力的求算公式计算。试验区 2013 年降雨量(P)与降雨侵蚀力(R)数据详见表 1。

表 1 试验区 2013 年降雨量和降雨侵蚀力季节分配

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降雨量/mm	2.20	3.40	4.60	8.20	123.40	126.00	99.20	148.80	50.30	87.00	5.20	2.20
降雨侵蚀力/(MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	0	0	0	0	354.79	569.83	220.86	316.19	131.41	129.13	0	0

(2) 径流量、泥沙含量的测定。每次典型降雨后立即量出标准径流场内的泥水总量,推算地表径流量;将集流池内泥沙与水样混匀,用 500 ml 取样瓶取

3 瓶水样,用比重法测定泥沙含量,推算泥沙量。

(3) 土壤容重和有机碳测定。采用环刀法测定土壤容重,土壤有机碳和泥沙结合态有机质采用重铬

酸钾法进行测定,径流溶解态有机碳=总有机碳流失量-泥沙结合态有机碳流失量。

(4) 土壤碳库指标计算方法。总有机碳质量分数(TOC)由有机质质量分数乘以 Bemmelen 换算系数,即 0.58;碳库指数(CPI)为有耕作措施小区土壤有机质质量分数与对照小区土壤有机质质量分数的比值,以原状坡面坡耕地为对照;土壤有机碳储量(m_{cr})计算公式^[10]为:

$$m_{cr} = A \cos \alpha (T \theta c) / 10$$

式中: m_{cr} ——土壤有机碳储量(kg); A ——小区实际面积(m^2); α ——小区坡度(弧度制); T ——土层厚度(cm); θ ——土壤体积质量(g/cm^3); c ——土层有机碳质量分数(%)。

1.4 数据分析

采用 SPSS 11.5 统计软件和 Excel 数据处理系统进行数据分析,并绘制图表。

2 结果与分析

2.1 坡耕地径流、泥沙流失规律及其特征

2013 年 14 场典型降雨的研究结果表明(表 2),14 场典型降雨的总降雨量达 360.00 mm,原状坡面和等高反坡阶处理坡面地表径流分别为 124.74 和 80.15 mm,前者是后者的 1.56 倍,且方差分析结果表明,2 个小区的径流量存在极显著差异($p < 0.01$)。等高反坡阶处理下每场产流降雨的地表径流量均小于原状坡面,其对地表径流的调控率在 5.56%~53.91%,平均控制率可达 35.75%,说明等高反坡阶

的径流调控作用显著;原状坡面和等高反坡阶处理坡面土壤流失总量分别为 382.60,196.50 t/km^2 ,且差异显著($p < 0.05$),等高反坡阶处理下每场产流降雨的土壤侵蚀量均较小,前者是后者的 1.95 倍,与原状坡面相比,产沙调控率在 18.84%~83.11%,平均调控率达 48.65%,说明等高反坡阶对泥沙的拦截效果显著。相对于径流调控率,等高反坡阶的泥沙调控率较高,说明其产沙调控作用更优。

2.2 等高反坡阶处理下泥沙和径流中有机碳分布特征

土壤侵蚀造成有机碳伴随着土壤一起被迁移和再分布,不仅导致土壤有机碳的大量流失且对生态系统碳循环产生重要影响。土壤有机碳随着径流和泥沙迁移以溶解态和泥沙结合态的形式流失,但二者流失规律呈现一定的差异。由表 3 可知,2013 年降雨期间 T_1 小区总有机碳流失量达 483.87 g,明显高于 T_2 小区总有机碳的流失量 285.55 g,这与 T_1 小区径流、泥沙流失量显著高于 T_2 小区的研究结果相一致。由于有机碳的流失是伴随着径流和泥沙的产生而发生的,因此有机碳的流失量不仅取决于径流、泥沙流失总量,且与径流、泥沙中有机碳含量关系密切。研究结果表明,2 个小区泥沙结合态有机碳占总有机碳流失量的百分比均达到 85%以上,最高达 95.38%,从径流溶解态和泥沙结合态中有机碳的流失量来看,有机碳的流失主要是以泥沙为载体产生的。因此,泥沙结合态是迳者小流域坡耕地土壤侵蚀中有机碳流失的主要方式,且 T_1 小区泥沙结合态有机碳占总有机碳流失量的比例高于 T_2 小区。

表 2 试验区 2013 年坡耕地降雨径流及泥沙的输出特征

降雨日期	降雨量/mm	降雨强度/($mm \cdot h^{-1}$)	地表径流量/mm		减流率/%	土壤侵蚀/($t \cdot km^{-2}$)		减沙率/%
			T_1	T_2		T_1	T_2	
0520	19.80	8.40	3.90	3.05	21.79	11.30	8.90	20.89
0522	29.00	9.60	4.05	3.40	16.05	17.30	14.00	18.84
0525	18.60	6.30	4.82	4.25	11.83	22.30	14.40	35.43
0601	45.20	8.60	28.10	20.50	27.05	110.30	82.70	25.02
0607	12.40	9.80	7.05	4.35	38.30	29.90	17.50	41.57
0610	16.40	3.40	3.12	2.30	26.28	13.60	10.50	22.79
0627	29.80	12.80	5.95	2.90	51.26	29.30	12.80	56.31
0718	39.20	8.80	10.10	5.35	47.03	24.80	5.40	78.18
0720	16.80	6.80	3.97	3.50	11.84	11.00	3.50	68.18
0802	25.00	6.80	4.50	4.25	5.56	22.50	7.50	66.74
0811	52.80	8.20	27.00	13.75	49.07	52.50	10.10	80.76
0815	17.40	4.80	9.33	4.30	53.91	18.90	3.20	83.11
0902	16.80	7.80	9.10	5.35	41.21	13.00	3.90	70.00
1022	20.80	8.80	3.75	2.90	22.67	5.90	2.10	64.71
合计	360.00		124.74	80.15	35.75	382.60	196.50	48.65

注: T_1 常规顺坡耕作, T_2 顺坡耕作+等高反坡阶。下同。

表 3 试验区土壤有机碳流失特征

处理	总有机碳 流失/g	径流溶解态有机碳 流失量/g	泥沙结合态有机碳 流失量/g	泥沙结合态有机碳占总有机碳流失量比例	
				变化范围/%	均值/%
T ₁	483.87	33.00	450.87	91.54~95.38	93.18
T ₂	285.55	29.61	255.94	85.15~92.56	89.63

2.3 等高反坡阶处理对土壤碳库的影响

2.3.1 对土壤总有机碳的影响 由表 4 可以看出,在松华坝迳者小流域定位试验中,不同坡面处理条件下,土壤有机碳的动态变化特征基本一致。随着雨季的到来,土壤有机碳含量从 5 月开始明显减少,除 2013 年 9—10 月土壤有机碳含量略有增长外,其余月份土壤有机碳含量呈逐月降低的趋势,且 2 种坡面处理的小区,有机碳含量的减少率均在 5 月达到最大值,这主要是由于开垦后,土壤扰动,破坏和分散土壤团聚体,增加通气性,改变土壤水热条件,微生物活性增加,增加新鲜有机质与土壤基质接触,使有机物料易于分解^[11]。且作物生长后,转化吸收了土壤有机质的营养。

土壤有机碳减幅较大的另一个原因是这一时期正是作物生长苗期,植被覆盖度较差,低覆盖加上高强度的降雨侵蚀力导致产流初期径流、泥沙携带大量

的表层肥沃、疏松的土壤颗粒,进而造成土壤有机碳在雨季初期流失严重,其后随着作物生长,植被覆盖度逐渐增加,扰动土壤逐渐沉实,土壤有机碳的流失率减少,至作物收获,由于作物根系的腐解及残茬的输入,归还了一部分有机碳,导致土壤有机碳含量从 9 月开始呈现较小的增长。对比不同坡面处理条件下的 2 种小区土壤有机碳的动态变化特征可以发现,雨季开始前 T₁ 小区与 T₂ 小区有机碳含量相差为 5.70%,至雨季结束 T₁ 小区与 T₂ 小区有机碳含量相差高达 12.76%,T₂ 小区各月份土壤有机碳含量明显高于 T₁ 小区,而土壤有机碳含量的减少率则反之,从 2013 年 5 月进入雨季开始至 2013 年 10 月雨季结束 T₁ 小区土壤有机碳含量减少率高达 11.84%,明显高于 T₂ 小区同期土壤有机碳含量的减少率 4.71%,说明坡面的等高反坡阶处理对坡耕地土壤有机碳减少具有很好的调控作用。

表 4 各小区土壤有机碳含量的动态变化

时间	月降雨量/ mm	原状坡面		等高反坡阶坡面	
		有机碳含量/(g·kg ⁻¹)	减少率/%	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)	减少率/%
201304	8.20	16.21±0.11	—	17.19±0.71	—
201305	113.40	13.89±0.35	14.31	15.21±0.65	11.52
201306	99.20	12.72±0.68	8.42	14.58±0.68	4.14
201307	126.00	12.03±0.30	5.42	13.88±0.21	4.80
201308	148.80	11.89±0.52	1.16	13.15±0.58	5.26
201309	50.30	13.26±0.19	-11.52	14.37±0.31	-9.28
201310	87.00	14.29±0.23	-7.77	16.38±0.12	-13.99

注:有机碳含量数据为:均值±标准差。

2.3.2 对土壤碳储量的影响 为了揭示坡面等高反坡阶对土壤碳库的影响,对 2 个小区降雨前后土壤碳库指数和土壤碳储量进行比较分析。根据表 5 可知,在相同的作物种植条件下,不同坡面处理对土壤碳库指数和土壤碳储量的影响具有一定的差异性。雨季前 T₂ 小区土壤碳储量为 453.82 kg 比 T₁ 小区高 12.91 kg,同时土壤碳库指数为 T₁ 小区的 1.07 倍;雨季后 T₂ 小区土壤碳储量为 435.71 kg,比 T₁ 小区高 38.45 kg,且土壤碳库指数为 T₁ 小区的 1.15 倍。至雨季结束,2 个小区土壤有机碳储量较雨季前均有明显的减少,其中 T₁ 小区土壤碳储量减少率达 9.90%,明显高于 T₂ 小区土壤碳储量的减少率 3.99%,说明坡耕地土壤耕作对土壤固定有机碳产生

明显的负效应,随着雨季的进行土壤碳储量不断减少,可见降雨引起土壤侵蚀使导致土壤碳储量减少的一个关键因素,而坡耕地等高反坡阶措施的实施对土壤有机碳的积累和固定具有明显的影响作用。与 T₁ 小区相比,T₂ 小区土壤碳储量的减少幅度较小,可以看出坡耕地等高反坡阶措施的实施对土壤有机碳库的调节具有重要影响。

2.4 等高反坡阶处理下有机碳流失的影响因素相关分析

为了确定坡耕地土壤有机碳流失的影响因素,通过对 2 个试验小区土壤有机碳流失量与降雨量、降雨侵蚀力、径流量和泥沙流失量进行了相关关系进行了分析。结果表明,2 个小区土壤有机碳的流失率与降

雨量均未达到显著水平,但与降雨侵蚀力呈显著的正相关关系($p < 0.05$),且 T_2 小区相关系数 0.798 低于 T_1 小区相关系数 0.870。这是因为降雨侵蚀力反映的是降雨动能与最大 30 min 雨强的综合作用,在坡耕地坡面径流小区,坡面流失量由降雨量和 I_{30} 两项因素决定,因此降雨侵蚀力对土壤有机碳的流失影响

高于降雨量。2 个小区土壤有机碳的流失率与径流量和土壤侵蚀量均达到显著水平($p < 0.05$), T_1 小区土壤有机碳的流失率与径流和泥沙的相关水平分别达 0.831 和 0.863, T_2 小区土壤有机碳的流失率与径流和泥沙的相关水平分别达 0.827 和 0.789,从相关系数大小来看,泥沙是坡耕地土壤有机碳流失的主要形式。

表 5 各小区表层土壤有机碳库指数和碳储量

时间	处理	土壤体积质量/ ($g \cdot cm^{-3}$)	土层/cm	总有机质质量分数/ ($g \cdot kg^{-1}$)	总有机碳质量分数/ ($g \cdot kg^{-1}$)	碳库指数	土壤碳储量/ kg
201304	T_1	1.36	20	28.39	16.21	1.00	440.91
	T_2	1.32	20	30.08	17.19	1.07	453.82
201310	T_1	1.39	20	25.80	14.29	1.00	397.26
	T_2	1.33	20	28.17	16.38	1.15	435.71

3 讨论

土壤有机碳是陆地生态系统碳库的重要组成部分,土壤侵蚀作为一个全球性的地质现象,引起土壤碳迁移,不仅造成了土地生产力降低,而且对土壤碳平衡及陆地生态系统碳循环产生很大的影响,也在一定程度上加剧了全球变暖的趋势^[12],有研究^[13-14]表明,土壤侵蚀过程可导致有机质的损失。坡耕地是云南地区水土流失最为严重的区域,研究期间,随着降雨的进行,土壤有机碳含量不断减少,且主要以泥沙结合态形式流失,其流失量占有机碳总流失量的 85% 以上,这与贾伟松等^[15]研究发现泥沙是土壤有机碳流失的主要原因的结果相一致,有 95% 的碳随泥沙的迁移而流失。这可能是土壤质地、有机碳含量、耕作措施、降雨等综合作用的结果。Van Hemelryck 等^[16]研究表明,泥沙结合态碳主要为非活性碳,在土壤中稳定且含量高达 90% 左右,而水溶性有机碳为活性有机碳,仅占土壤总有机碳的 9%,且易被植物和微生物利用,加上雨季的淋溶作用,致使水溶性有机碳向下层迁移,导致径流的增加不会引起大量径流溶解态有机碳流失量的增加,却使泥沙流失量增加。且坡耕地翻耕开垦,土壤扰动,破坏和分散土壤团聚体,泥沙迁移量明显增加,致使泥沙结合态有机碳流失占总有机碳流失比例较高。因此,坡耕地径流、泥沙的控制成为水土保持和土壤碳库调节的关键因素。已有研究^[17]结果表明,在水土流失区,治理措施的减沙、减流是导致土壤有机碳改善的重要原因。

等高反坡阶是坡面径流、泥沙调节的重要措施之一。本研究发现,同一作物条件下,等高反坡阶对坡面地表径流的调控率可达 5.56%~53.91%,平均调控率为 35.75%,产沙调控率在 18.84%~83.11%,

平均调控率达 48.65%,说明等高反坡阶对坡耕地产流产沙的调控作用显著,且产沙量的减幅大于径流量的减幅,等高反坡阶对产沙的调控效果更优。这与以往的研究结果一致。如王萍等^[8]研究了等高反坡阶对云南红壤坡耕地水土流失的调控作用,结果表明,等高反坡阶对坡耕地水土流失调控作用显著;赵合理等^[7]通过研究黄土高原丘陵沟壑区不同水土保持措施对坡面降水再分配的影响,结果表明,水平阶草灌带可迟滞缓解降水在坡面的再分配过程,连续切断坡面径流流线,抑制径流泥沙发生。可见,等高反坡阶是坡面径流调节的有效措施,不仅使坡面径流得到调控,同时减少泥沙的产生。这主要是由于等高反坡阶通过对地表径流的再分配能有效拦截径流于阶内,其作用相当于截短坡长,降低径流势能,减缓了地表径流,蓄积径流增加入渗量,携沙能力下降,且由于等高反坡阶对径流的蓄积作用也减缓了径流的下移速度,从而增加了径流中泥沙的沉淀作用,大大减少了坡耕地产沙量,有效减缓了降雨对坡耕地的侵蚀和冲刷作用^[8,18]。所以,等高反坡阶具有对坡面局部径流的调控作用,不仅能蓄积部分降水,同时能保持水土,合理调控地表径流,改善坡耕地土壤水分和养分条件^[19-20]。

等高反坡阶措施的实施具有减少土壤有机碳储量损失的作用,并在一定程度上减缓了土壤有机碳库的负效应。研究期间,原状坡面小区土壤有机碳的流失率明显高于等高反坡阶小区,雨季前后,与原状坡面小区相比,等高反坡阶处理坡面小区土壤碳储量的减少幅度较小,这与郑海金等^[10]通过对坡面实施不同的水土保持耕作措施以提高土壤有机碳质量分数和增加土壤碳库的作用结果相似。等高反坡阶的布设正是通过控制土壤侵蚀控制坡耕地有机碳的流失,减少土壤有机碳储量的损失并在一定程度上减缓了

土壤有机碳库的负效应。研究表明^[21], 农田土壤碳储量的损失因气候、土壤初始含碳量和管理措施的不同而不同。一般而言, 耕作层(0—20 cm)损失最大, 可达 40%, 而本研究发现, 整个雨季期间 T_1 , T_2 小区土壤有机碳的流失量与土壤碳储量的减少量相比较小, 这主要与有机碳在土壤中扩散的复杂性有关, 研究发现^[22], 有机碳在土壤中的迁移扩散主要包括土壤中动物输送作用和微生物的迁移, 土壤中有有机碳的吸附、交换、降解及可溶性有机碳随溶液的迁移。而本研究仅对由于降雨产流所造成的土壤碳损失进行了分析。径流、泥沙作为坡耕地土壤养分流失的主要载体, 与土壤有机碳的流失率存在显著的正相关关系 ($p < 0.05$); 2 个小区土壤有机碳的流失率与降雨量均未达到显著水平, 但与降雨侵蚀力达到显著水平 ($p < 0.05$), 且 T_2 小区相关性低于 T_1 小区, 可能是由于等高反坡阶的存在, 改变了微地形, 使产流产沙过程更加复杂, 从而导致 T_2 小区有机碳的流失率与降雨侵蚀力的相关关系减弱。等高反坡阶对土壤有机碳流失的调控作用主要表现在通过分割坡面, 改变地表微地形, 截短径流流线, 增加入渗有效减缓了降雨对坡耕地土壤的侵蚀和冲刷作用, 拦蓄并减少坡面径流及径流所携带的泥沙与养分元素, 对于水土保持和土壤有机碳库的调控具有重要作用。

4 结论

(1) 坡耕地是红壤小流域水土流失最为严重的区域, 泥沙作为土壤有机碳流失的重要载体, 导致泥沙结合态有机碳的流失量占总有机碳流失量的 85% 以上, 最高达 95.38%; 而径流溶解态有机碳流失量所占总有机碳流失量的比例较小;

(2) 等高反坡阶通过减少径流泥沙输出从而降低坡耕地土壤碳的减少速率, 其对地表径流的调控率在 5.56%~53.91%, 平均控制率可达 35.75%; 产沙调控率在 18.84%~83.11%, 平均调控率达 48.65%。相对于径流调控率, 等高反坡阶的泥沙调控率较高, 说明其产沙调控作用更优。

(3) 坡耕地等高反坡阶措施的实施改变了地表微地形, 截短径流流线, 增加入渗, 拦蓄并减少坡面径流及径流所携带的泥沙与养分元素, 进而减少坡耕地有机碳的输出, 具有减少土壤有机碳储量损失的作用, 并在一定程度上减缓了土壤有机碳库的负效应。雨季前后, 原状坡面小区土壤碳储量减少率达 9.90%, 明显高于等高反坡阶小区土壤碳储量的减少率(3.99%);

(4) 由于坡耕地土壤有机碳随水沙迁移的复杂

性, 导致影响土壤有机碳流失的因素存在一定差异, 通过对土壤有机碳及相关影响因素的相关分析表明, 2 个小区土壤有机碳的流失率与降雨量均未达到显著相关水平, 但与降雨侵蚀力达到显著相关水平 ($p < 0.05$)。径流、泥沙作为有机碳流失的主要载体, 其与 2 个小区有机碳的流失率均达到了显著水平 ($p < 0.05$), 其中以泥沙流失对土壤有机碳流失的相关性影响较大。

(5) 由于土壤有机碳迁移扩散的复杂性, 导致雨季前后土壤有机碳损失占土壤碳储量损失的比例较少。因此, 坡耕地土壤碳迁移扩散损失途径及方式也是本课题今后重点研究的内容。

[参 考 文 献]

- [1] Bertol I, Engel F L, Mafra A L, et al. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(1):142-150.
- [2] Zhang Jianhui, Timothy A, Qunie T, et al. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion[J]. Global Change Biology, 2006, 12(10):1834-1841.
- [3] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. Environment International, 2003, 29(4):437-450.
- [4] Lal R. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect[J]. Climate Change, 2001, 51(1):35-72.
- [5] Lal R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon[J]. Advances in Agronomy, 2001, 71:145-191.
- [6] Timmermann A, Oberhuber J, Bacher A, et al. Increased El Nino frequency in a climate model forced by future greenhouse warming[J]. Nature, 1999, 398(6729):694-697.
- [7] 赵合理, 蒋定生, 范兴科. 不同水土保持措施对坡面降水再分配的影响[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2):75-83.
- [8] 王萍, 王克勤, 李太兴, 等. 反坡水平阶对坡耕地径流和泥沙的调控作用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5):1261-1267.
- [9] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning with the universal soil loss equation(USLE)[M]. Washington D C: USDA-ARS, Agricultural Handbook, 1978.
- [10] 郑海金, 杨洁, 汤崇军, 等. 不同水土保持耕作措施对径流泥沙与土壤碳库的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6):1-4, 10.

(下转第 52 页)

千粒重为 320 g, 绿肥处理的千粒重明显高于常规种植, 产量略低于常规耕作 3%, 但差异不显著。董立国等^[8]研究膜侧冬麦土壤水分和温度得出, 膜侧土壤水分明显高于膜内, 膜侧温度明显低于膜上。说明一定的地表处理措施明显影响着土壤水分。免耕等耕作措施的采用必定会影响到土壤水分的重新分配。本文得出部分结论, 但是关于不同耕作措施对土壤水分的利用研究, 仍然需要系统的长期的定位试验研究。

5 结论

(1) 在干旱的情况下, 免耕留茬处理能够显著增加表层土壤(0—20 cm)含水量。

(2) 试验处理均为免耕的情况下, 随着秸秆留茬高度的增加, 土壤水分呈现增加趋势。

(3) 常规耕作、免耕秸秆覆盖和免耕种植绿肥 3 种处理土壤水分分析得出, 在降雨量较大的情况下, 常规耕作处理在土壤表层贮存了较多的土壤水分, 免耕秸秆覆盖处理能够增加土壤 20—80 cm 土壤水分含量。

(4) 冬小麦休闲期种植覆盖作物(三角豆), 降低了土壤水分, 其降低幅度与降雨量以及种植密度有关, 种植密度越大, 对土壤水分的影响越大, 土壤水分的减少在本试验中不影响下一茬作物产量。

[参 考 文 献]

- [1] Hobbs P R. Conservation agriculture: What is it and why is it important for future sustainable food production? [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2007, 145(2): 127-137.
- [2] Hobbs P R, Ken S, Raj G. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society(B): Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 543-555.
- [3] 李青, 高志强, 孙敏, 等. 偏早年休闲期施肥覆盖对旱地小麦播前土壤水分的影响及其与产量的相关分析 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29(9): 112-116.
- [4] 白冬, 高志强, 孙敏, 等. 休闲期深翻覆盖对旱地小麦水氮利用效率和产量的影响 [J], *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1497-1503.
- [5] 温斐斐, 孙敏, 邓联峰, 等. 旱地小麦休闲期深翻覆盖对土壤水分及其利用效率的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(11): 1358-1364.
- [6] 刘爽, 武雪萍, 吴会军, 等. 休闲期不同耕作方式对洛阳冬小麦农田土壤水分的影响 [J]. *中国农业气象*, 2007, 28(3): 292-295.
- [7] 王小彬, 蔡典雄, 金轲, 等. 旱坡地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36(9): 1044-1049.
- [8] 董立国, 袁汉民, 火勇, 等. 膜侧冬麦土壤水分温度时空变化规律研究 [J]. *节水灌溉*, 2007, 32(8): 1-3.
- (上接第 46 页)
- [11] Lal R, Follett R F, Kimle J, et al. Managing U S cropland to sequester carbon in soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 54(1): 374-381.
- [12] 章明奎, 刘兆云. 红壤坡耕地侵蚀过程中土壤有机碳的选择性迁移 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 45-49.
- [13] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 土壤侵蚀对农田中土壤有机碳的影响 [J]. *地理科学进展*, 2004, 23(2): 77-87.
- [14] 李光录, 张胜利. 黄土高原南部侵蚀对不同土壤颗粒级碳氮分布的影响 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(8): 146-150.
- [15] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究 [J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 88-90.
- [16] van Hemelryck H, Firner P, van Oost K, et al. The effect of soil redistribution on soil organic carbon: An experimental study [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(12): 3971-3986.
- [17] 毕银丽, 王百群, 郭胜利, 等. 黄土丘陵区坝地系统土壤养分特征及其与侵蚀环境的关系: 坝地土壤理化性状及其数值分析 [J], *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(3): 1-9.
- [18] 邢鹏远, 王克勤, 杨绍兵, 等. 反坡水平阶水土保持效益观测 [J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(2): 119-124.
- [19] Ojasvi P R, Goyal R K, Gupta J P. The micro-catchment water harvesting technique for the plantation of jujube (*Zizyphus mauritiana*) in an agroforestry system under arid conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 41(3): 139-147.
- [20] Gupta G N, Limba N K, Mutha S. Growth of *Prosopis cineraria* on microcatchments in an arid region [J]. *Annals of Arid Zone*, 1999, 38(1): 37-44.
- [21] Davidson E A, Ackermann I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of, previously untilled soils [J]. *Biogeochemistry*, 1993, 20(3): 161-193.
- [22] 张东辉, 施明恒, 金峰, 等. 土壤有机碳转化与迁移研究概况 [J]. *土壤*, 2000, 35(6): 305-309.