

黄土丘陵区不同退耕方式土壤有机碳密度的差异及其空间变化

李俊超¹, 郭胜利^{1,2,3*}, 党廷辉^{1,2,3}, 张彦军², 李娜娜²

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中科院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:比较退耕条件下流域间土壤有机碳密度(SOCD)的变化,有助于理解黄土高原区域土壤有机碳源/汇效应的变化机理。在黄土丘陵沟壑区,自北向南从砒沙岩区、风蚀水蚀交错区、水蚀区分别选取五分地沟、砖窑沟、燕沟三个典型治理小流域,研究了坡地退耕为林草地后 SOCD 变化及其影响因素。结果表明:(1)流域内,林草地 SOCD 显著大于坡耕地,表层 0~10 cm 高于亚表层 10~20 cm,且差异显著($P<0.05$)。(2)流域间,同一土地利用方式 SOCD 因流域存在显著差异($P<0.05$)。从北到南,坡耕地和林地 SOCD 基本呈增加的趋势,坡耕地表层 SOCD 分别是 0.54、0.56 kg·m⁻² 和 0.61 kg·m⁻²,林地 SOCD 依次为 0.64、0.90 kg·m⁻² 和 1.05 kg·m⁻²;而草地先略有下降后又呈增加的趋势,分别为 0.71、0.67 kg·m⁻² 和 0.73 kg·m⁻²。(3)相对于坡耕地,流域间同一退耕方式 SOCD 的增幅存在一定的空间分异。退耕还林方式下 SOCD 的增幅从北到南依次变大,由五分地沟流域表层的 18.8%变化到燕沟流域的 72.7%;退耕还草 SOCD 的增幅较小,从 32.1%变化到 20.1%。可见,在黄土丘陵沟壑区,退耕方式不仅影响流域内 SOCD 含量的变化,而且影响流域间 SOCD 增幅的变化,这一变化与南北流域的气候条件、生物因素(细根生物量)、土壤性质以及土壤侵蚀强度密切相关。

关键词:土壤有机碳密度;小流域;空间变异;退耕还林(草);黄土丘陵区

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)06-1167-07 doi:10.11654/jaes.2014.06.017

Spatial Variations in Soil Organic Carbon Density Under Different Restoration Practices in Loess Hilly-gully Region

LI Jun-chao¹, GUO Sheng-li^{1,2,3*}, DANG Ting-hui^{1,2,3}, ZHANG Yan-jun², LI Na-na²

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China)

Abstract: Studying spatial variation of soil organic carbon density (SOCD) is helpful for exploring the mechanisms of carbon sequestration under different restoration practices in the Loess Plateau. Wufendigou, Zhuanyagou, and Yangou watersheds were selected across the hilly-gully region of Loess Plateau from North to South. Changes in SOCD in these three watersheds were analyzed during conversion of cropland into grassland and woodland. In the same watershed, SOCD was higher in woodland and grassland than in sloping farmland, and greater in surface (0~10 cm) than in subsurface (10~20 cm) ($P<0.05$). Under the same land use, SOCD showed significant spatial distribution ($P<0.05$) among three watersheds. From North to South, SOCD changed from 0.54 kg·m⁻² to 0.56 kg·m⁻², and to 0.61 kg·m⁻² for sloping farmland, from 0.64 kg·m⁻², to 0.90 kg·m⁻² and to 1.05 kg·m⁻² for woodland, and from 0.71 kg·m⁻², to 0.67 kg·m⁻² and to 0.73 kg·m⁻² for grassland. Compared to the sloping farmland, percent increase in SOCD caused by converting cropland into woodland or grassland had spatial variations from North to South. In woodland, the percentage was 18.8% in Wufendigou watershed to 72.7% in Yangou watershed, whereas in grassland it ranged from 32.1% (North) to 20.1% (South). Our results indicate that SOCD is closely related with climate conditions, biological factor (the fine-root biomass), soil properties and soil erosion intensity in hilly-gully region of the Loess Plateau.

Keywords: soil organic carbon density; small watershed; spatial variation; conversion of cropland into grassland or woodland; loess hilly-gully region

收稿日期:2014-01-08

基金项目:国家自然科学基金(41071338);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)

作者简介:李俊超(1988—),男,河南项城人,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态学。E-mail:lijunchao1212@126.com

*通信作者:郭胜利 E-mail:slguo@ms.iswc.ac.cn

土地利用变化是影响陆地生态系统碳循环的重要因素,毁林开荒会导致土壤有机碳(SOC)储量降低。至1993年全世界已有约0.75亿 hm^2 的森林被用作农田(占土地利用变化的45%),致使1 m土层深度内SOC损失高达25%~30%^[1];北美洲加拿大黑钙土开垦后SOC含量降低了50%^[2];热带森林开垦为香蕉园SOC下降37%^[3];亚热带山区天然林转变为其他土地利用方式后,表层SOC储量下降了45.1%~74.8%^[4]。相反,生态恢复会显著提高SOC储量。大面积坡耕地和荒地得到植被重建和恢复后,土壤碳库会发生显著变化^[5]。造林5年后,随着植被的不断恢复和更新,SOC逐年增加^[6],24年后湿地松林的土壤碳储量显著增加,碳汇最大^[7]。我国东部平原区农地转为林地和草地19年后表层SOC含量提高量分别约为1.4%和1.5%^[8-9]。受气候、地形地貌、水文条件和植被类型等因素的影响,陆地生态系统中的SOC及其变化具有显著的空间变异性。了解土地利用变化条件下碳储量的空间变化及其影响因素对准确估算土壤碳库的源汇效应具有十分重要的意义。

黄土丘陵沟壑区是我国乃至世界水土流失最严重的区域,水土流失面积约为18万 km^2 ,土壤侵蚀模数更是高达20 000 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。严重的水土流失可直接导致土壤退化和SOC库减小^[10-11]。植被恢复尤其是退耕还林还草是治理黄土高原水土流失、提高碳储量的重要措施。退耕还草初期,表层土壤有机碳密度(SOC density, SOCD)的增幅达36%~39%^[12];还林10~15年后SOCD将比耕地增加2.1~3.6倍^[13],甚至有的地区顶级林地群落SOC是坡耕地的6倍以上^[14]。但这些研究大都集中在同一流域尺度内,流域间退耕还林还草方式下SOCD空间分布差异及其影响因素鲜有报道。因此,研究退耕方式下流域间SOCD变化对深入了解生态环境建设过程中黄土高原地区碳汇格局和变化具有重要意义。

针对黄土高原地区大规模的水土流失治理,本研究从北到南选取黄土丘陵沟壑区三个典型治理小流域,研究流域内和流域间SOCD的空间分布特征,分析退耕还林还草条件下SOCD增幅的空间变异,并探讨不同退耕方式导致的SOCD增幅南北空间差异的原因。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

基于黄土高原气候和植被的地带性分异,从北到

南选取三个综合治理小流域:内蒙古准格尔旗五分地沟流域(简称五分地沟流域)、山西河曲县砖窑沟流域(简称砖窑沟流域)、陕西延安市燕沟流域(简称燕沟流域)。上述三个流域依次代表中温带半干旱气候、暖温带半干旱气候、暖温带半湿润向半干旱过渡的气候带,对应的植被带分别为荒漠草原带、暖温带森林草原、落叶阔叶林向温带草原过渡地带(各流域的自然地理概况详见表1)。以小流域为单元,以坡改梯和退耕还林还草(人工植树种草为主,自然恢复为辅)为中心是黄土高原小流域综合治理的主要内容。经过20多年的综合治理,流域的土壤侵蚀明显降低,土壤生产力大幅度提高,取得了显著的社会、经济和生态效益^[15-16]。

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法

2009—2011年,依次在三个小流域开展野外调查和样品采集。土壤、根系及土壤容重样品的采集按照以下方案进行:沿上中下游3个横断面,基于坡地上3种土地利用方式(坡耕地、退耕后的林地、退耕后的草地)布设样方(约10 m×10 m),三个流域共设置370个样方,同时充分考虑空间异质性,每个样方设3~5次重复。在每个样方内采用“S”型路线选择5个点,用内径3 cm的土钻采集表层(0~10 cm)和亚表层(10~20 cm)土壤样品,同层5点土样混匀。各流域不同土地利用方式下土壤样方和样品统计信息见表2。考虑野外采样的可操作性,在土壤样方中,选择代表性样方,用内径为9 cm的根钻采集表层和亚表层林地根系样品,五分地沟、砖窑沟和燕沟流域分别选取7、7个和9个样方,每个样方重复5次,共采集230个根系样品。从各流域每种土地利用方式的土壤样方中均选取3个代表性样方,用容积100 cm^3 的环刀采集0~10 cm和10~20 cm土层原状土,每个样方3次重复,共采集土壤容重样品162个。各样方利用GPS定位,并调查植被生长状况等信息。

1.2.2 样品分析

土壤样品在室内进行自然风干,风干的土样混匀后过0.25 mm筛,用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法^[17]测定SOC含量。从根系样品的土壤中挑出所有根系,按处理和重复编号后放入塑封袋中,用水清洗干净后,按直径 ≤ 2 mm(细根)和 > 2 mm(粗根)分为两级。将细根用小纸袋装好置于鼓风干燥箱中以70~80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,再分别称重和记录。将采集的土壤容重样品于105 $^{\circ}\text{C}$ 鼓风干燥箱中烘干至恒重,测定土壤含水量,然后由环刀体积计算出土壤容重。

表 1 研究区各流域的自然地理概况
Table 1 Physio-geographic characteristics of studied areas

流域	五分地沟流域	砖窑沟流域	燕沟流域
类型区	砒沙岩区	风蚀水蚀交错区	水蚀区
面积/km ²	7.7	29.11	48
经度	111°07'00"~111°09'01"	111°12'03"~111°19'28"	109°20'00"~109°35'00"
纬度	39°43'01"~39°46'00"	39°11'06"~39°13'47"	36°28'00"~36°32'00"
海拔/m	1080~1220	845~1244	986~1425
年均温/℃	7.3	8.8	9.8
降水量/mm	389.6	447.5	558.4
侵蚀模数/t·km ⁻² ·a ⁻¹	21 000	20 000	9000
黏粒含量/%	8.9	8.3	15.2
退耕开始年份	1986	1986	1988
优势植被和农作物	本氏针茅、百里香、冷蒿、沙棘、柠条、沙柳、糜子、玉米、小麦等	柠条、沙棘、草木樨、冰草、紫花苜蓿、小麦、糜子、玉米等	沙棘、柠条、狼牙刺、辽东栎、刺槐、小叶杨、油松、铁杆蒿、白羊草、玉米、小麦等
地貌类型	覆沙黄土丘陵沟壑区	黄土丘陵沟壑区	黄土丘陵沟壑区
土地利用类型	农田、林地、草地	农田、林地、草地	农田、林地、草地
主要土壤类型	栗钙土、风沙土	栗褐土	黄绵土

注:主要植物和作物:本氏针茅(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus serpyllum*)、冷蒿(*Atrémisia frigida*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix psammophyla*)、糜子(*Panicum miliaceum*)、玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)、草木樨(*Melilotus suaveolens*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)。

表 2 三个流域土壤样方(不计重复)和样品信息统计
Table 2 Soil samples collected in three watersheds

土地利用方式	五分地沟流域			砖窑沟流域			燕沟流域			作物类型或群落优势种
	样方数	所占比例/%	样品数	样方数	所占比例/%	样品数	样方数	所占比例/%	样品数	
坡耕地	12	18	120	15	22	150	44	19	264	糜子、玉米、小麦等
林地	28	42	280	17	25	170	136	58	816	刺槐、油松、沙棘、柠条等
草地	27	40	270	35	52	350	56	24	336	禾本科、苜蓿、蒿属等
总计	67	100	670	67	100	670	236	100	1416	坡耕地常规施肥,林草地无施肥管理

1.3 数据处理及分析

1.3.1 土壤有机碳密度和细根生物量密度的计算

$$SOCD=10\times SOC\times BD/100 \quad (1)$$

式中: SOC 为土壤有机碳密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$; 10 为土层厚度, cm ; SOC 为土壤有机碳含量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; BD 为土壤容重, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; 100 为单位转化系数。

$$R_d=100\times R_m/[\pi/(d/2)^2] \quad (2)$$

式中: R_d 为细根生物量密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; R_m 为根钻所采集 10 cm 深的土层中根的干物重, g ; d 为土钻内径, cm ; 100 为单位转化系数。

1.3.2 数据分析

利用 Microsoft Excel 2003 进行数据的初处理;使用 SAS 9.2 软件统计分析了土层深度、土地利用、流域间 SOC 变异性的影响, 方差分析取 $\alpha=0.05$;用 Sigmaplot 12.0 作图软件完成细根生物量密度与 SOC 相关分析各参数的计算,并制作相关图形。

2 结果与分析

2.1 流域内不同土地利用方式下 SOC 的变化特征

由图 1 可知,在五分地沟流域,无论表层或是亚表层, SOC 均表现为草地>林地>坡耕地, 且三者存在显著差异($P<0.05$)。草地表层 0~10 cm SOC 为 $0.71 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 分别是坡耕地和林地的 1.3 倍和 1.1 倍, 亚表层 10~20 cm SOC 相对坡耕地和林地的增幅略小于表层, 且三种土地利用方式下表层和亚表层 SOC 的差异均达到显著水平($P<0.05$)。在砖窑沟流域,林地表层的 SOC ($0.91 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 最大,草地 ($0.67 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 次之,坡耕地 ($0.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 最小,且不同土地利用方式间存在显著差异($P<0.05$);亚表层的变化特征与表层基本一致。在燕沟流域,不同土地利用方式下 SOC 的变化特征和砖窑沟流域的基本一致,林地与坡耕地、草地间均有显著差异($P<0.05$)。综上,流域

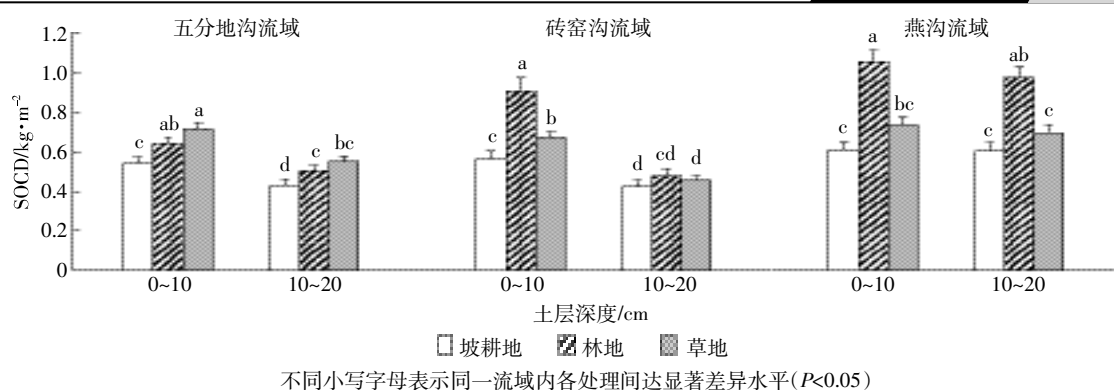


图1 流域内 SOCD 的变化特征

Figure 1 Variations of SOCD under different land use types in the same watershed

内三种土地利用方式下 SOCD 呈林草地大于坡耕地, 表层高于亚表层的趋势, 且差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 同一土地利用方式下流域间 SOCD 的变化特征

坡耕地条件下, 北部的五分地沟流域表层 SOCD 最低, 平均为 $0.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 砖窑沟流域稍高, 为 0.56

$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 南部的燕沟流域最高 ($0.61 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$), 较五分地沟流域提高 13%; 亚表层 SOCD 变化趋势基本和表层一致, 但增加的幅度不同 (图 2)。林地条件下, 五分地沟流域表层 SOCD 最低 ($0.64 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$), 砖窑沟流域较之提高 41.1%, 燕沟流域的 SOCD 最高 ($1.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$),

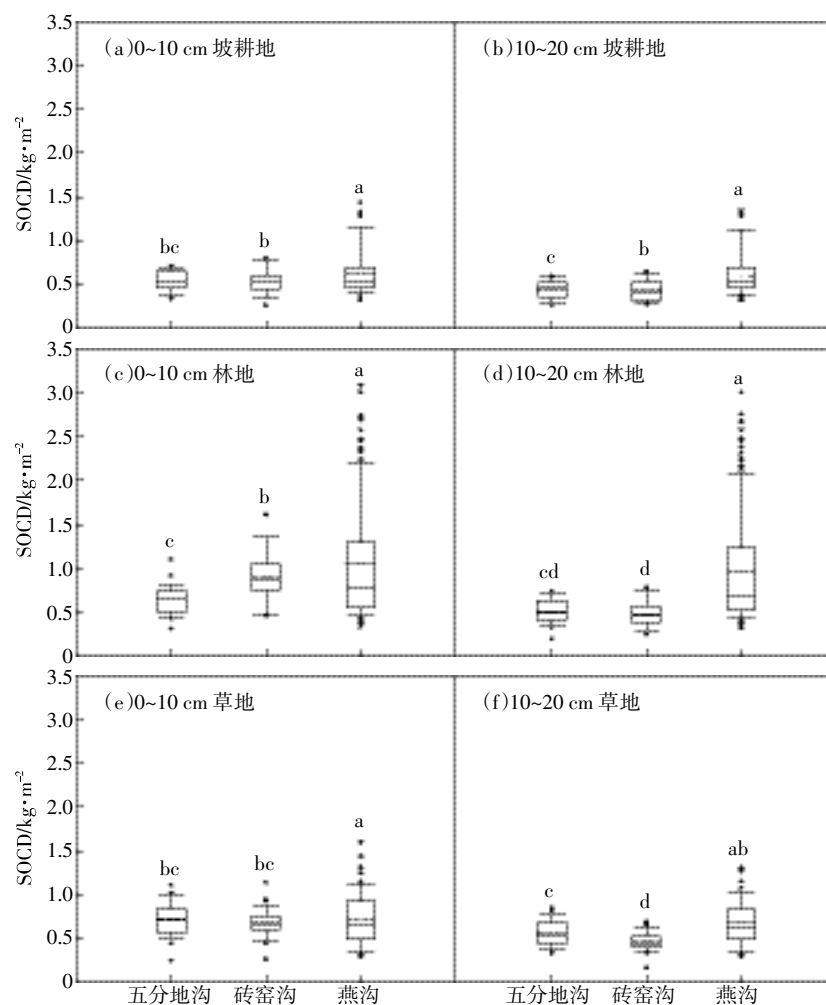


图2 流域间不同土地利用方式 SOCD 的变化

Figure 2 Variations of SOCD under different land uses among three watersheds

相较五分地沟提高 64.1%;亚表层 SOCD 呈先稍微下降后大幅增加的 trend, 从北到南三流域分别为 0.50、0.48、0.97 kg·m⁻²。草地条件下, 表层的 SOCD 从北到南呈先减小后增加的空间变异性, 五分地沟流域 SOCD 的均值为 0.71 kg·m⁻², 砖窑沟流域稍微下降, 为 0.67 kg·m⁻², 燕沟流域最高, 为 0.73 kg·m⁻²;亚表层三个流域的 SOCD 空间变化趋势和表层的相似。总体来看, 流域间, 从北到南, 坡耕地、林地 SOCD 基本呈依次增加的趋势, 而草地表现为先略有下降后又升高的趋势。三种土地利用下 SOCD 因流域存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.3 流域间退耕还林还草 SOCD 增幅的比较

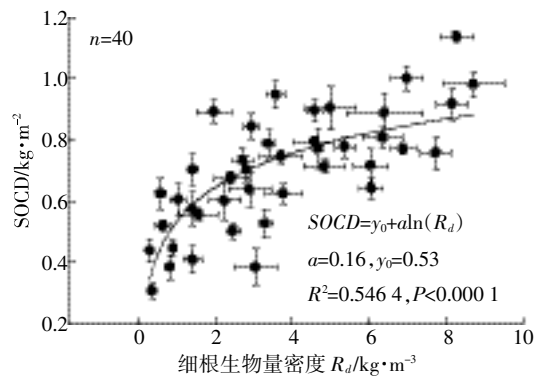
同一退耕方式下, SOCD 增幅因流域存在差异 (表 3)。退耕还林方式下 SOCD 的增幅从北到南呈逐渐增加的趋势, 由五分地沟流域表层 SOCD 的 18.8% 到燕沟流域的 72.7%, 增加近 3 倍, 由 0.10 kg·m⁻² 增加到 0.44 kg·m⁻²;退耕还草方式下 SOCD 的增幅在流域间的差异相对较小, 增量从北部的 0.17 kg·m⁻² 变化到南部的 0.13 kg·m⁻², 降低了 30%。亚表层退耕还林和还草下 SOCD 的增幅和增量均与表层的变化特征基本一致, 但数值均小于表层。表明南部燕沟流域退耕还林方式对 SOCD 增加的贡献明显优于退耕还草, 而北部五分地沟流域退耕还草方式则大于退耕还林, 南北流域间同一退耕方式下 SOCD 的增幅存在一定的空间变异性, 且两种不同退耕方式下流域间 SOCD 增量的变化规律也存在显著差异。

3 讨论

研究区域地处水土流失区, 退耕后 SOC 含量显著升高, 退耕还林方式下表层 SOCD 增量范围为 0.10~

0.44 kg·m⁻², 均值是 0.30 kg·m⁻²;退耕还草方式下表层 SOCD 增量范围为 0.13~0.17 kg·m⁻², 均值是 0.14 kg·m⁻²。这些结果与徐明祥等^[18]、王春梅等^[19]和韩新辉等^[20]的研究结果基本一致。此外, 本研究结果显示, 因退耕 SOCD 增幅存在显著空间差异, 表现出退耕还林方式下 SOCD 的增幅从北到南呈逐渐增大的趋势 (由北部的 18.8% 到南部的 72.7%, 增加近 3 倍); 而退耕还草 SOCD 的增幅从北到南稍微下降 (由 32.1% 变化到 20.1%)。SOCD 增幅南北空间差异可能与以下三个因素有关:

(1) 细根生物量空间差异。细根生物量及其周转是影响 SOC 积累的重要因素 (Usman 等^[21]、Zhang 等^[22]和 Upson 等^[23])。在本研究中, SOCD 随着根系生物量输入的增加, 呈对数增长的趋势 ($SOCD = SOCD_0 + a \ln(R_d)$, $R^2=0.55$, $P<0.01$) (图 3)。这一结果表明, 在该区域随着退耕后植被的恢复, 细根生物量的增加是导致 SOCD 提高的重要驱动因素。其次, 细根生物量密度



细根生物量密度与其对应的碳密度的拟合方程: $SOCD = y_0 + a \ln(R_d)$ 。
 y_0 表示当根系的输入量无限小或没有根系输入时 SOCD 值;
 a 为斜率, 表示 SOCD 随细根生物量密度增加的速率,
在相同的细根生物量密度条件下, a 值越大, SOCD 越大

图 3 三流域林地细根生物量密度与 SOCD 之间的相关关系

Figure 3 Relationship between fine-root biomass density and SOCD among three watersheds

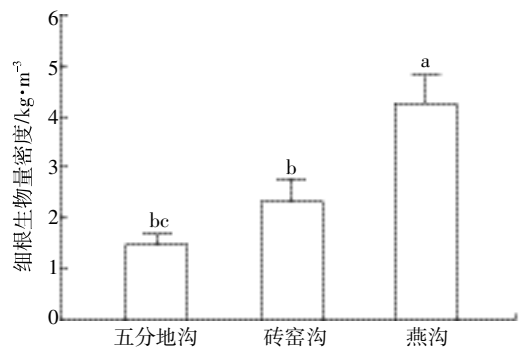


图 4 流域间林地细根生物量密度分布

Figure 4 Distribution of fine-root biomass density among three watersheds

表 3 退耕还林还草 SOCD 增幅(量)的变化

Table 3 Increments of SOCD under different conversion practices

流域	土层 深度/cm	退耕还林		退耕还草	
		增量/kg·m ⁻²	增幅/%	增量/kg·m ⁻²	增幅/%
五分地沟流域	0~10	0.10	18.8	0.17	32.1
	10~20	0.07	16.8	0.12	27.6
砖窑沟流域	0~10	0.36	66.5	0.13	23.7
	10~20	0.05	12.3	0.03	7.4
燕沟流域	0~10	0.44	72.7	0.13	20.1
	10~20	0.37	61.6	0.09	15.2
三个流域平均	0~10	0.30	52.7	0.14	25.3
	10~20	0.17	30.2	0.08	16.7

注: 增量=林(草)地 SOCD-坡耕地 SOCD; 增幅=[林(草)地 SOCD-坡耕地 SOCD]/坡耕地 SOCD

从北到南由 $1.49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 变化到 $4.26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 增加了 2.8 倍(图 4)。退耕方式下, 细根生物量差异可能是造成南北 SOC 增幅分异的重要原因。天然降水不足是制约黄土高原植被生长及其分布的关键因子^[24-25], 南部燕沟流域的年降水量为 558.4 mm, 而北部五分地沟流域降水量(389.6 mm)仅为燕沟流域的 70%。降水量的南北分异是导致植被生物量和细根生物量密度差异的重要原因。北部降水量能够满足草本植物正常生长发育^[26-27], 却不足以支撑刺槐、杨树等高大乔木林的形成^[28-29], 而南部的降水量可以提供乔木正常生长所需的水分条件^[26]。同时, 植被的生长及其分布, 又会影响根系生物量, 进而影响有机物的输入^[30-31]。因此, 相对而言, 南部较北部退耕还林对增加 SOC 效果更好, 北部退耕还草比较适宜。

(2) 土壤性质。土壤黏粒含量是影响 SOC 积累的重要因素^[32-33], SOC 与黏粒含量之间存在显著的正相关^[34]。燕沟流域黏粒含量(15.2%)约是五分地沟流域(8.9%)的 1.7 倍, 相应的同一退耕方式下 SOC 也较五分地沟流域的高。其次, 北部五分地沟流域地处砒沙岩区, 土壤以栗钙土、风沙土为主, 南部燕沟流域以黄绵土为主, 南北土壤基础 SOC 存在差异。北部流域坡耕地的基础 SOC 较南部流域低, 在退耕条件下较南部易于快速增加 SOC 的含量。

(3) 土壤侵蚀强度。土壤侵蚀不同程度地降低 SOC 的含量(Polyakov 等^[35]和 Lal^[36]), 且随侵蚀强度的增加 SOC 的损失增大^[37]。五分地沟流域地处风蚀水蚀和重力侵蚀都比较严重的区域, 侵蚀模数为 $21\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 而燕沟流域土壤侵蚀模数为 $9000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 仅为五分地沟流域的 43%, 相应的 SOC 的损失量也较小。另外, 五分地沟流域较燕沟流域多大风, 乔灌木形成的凋落物很容易被吹散到低洼区域, 使得乔灌木林下聚集的很少, 而草本植物由于根系作用, 不宜被风搬运, 在原地堆积、腐解, 易于积累 SOC, 因此退耕还林下 SOC 的增幅北部小于南部, 而退耕还草对 SOC 增幅的影响南北差异不大。

4 结论

(1) 流域内, 三种土地利用方式下表层 0~10 cm 和亚表层 10~20 cm SOC 呈林草地大于坡耕地, 表层 SOC 大于亚表层的趋势, 且差异显著($P < 0.05$)。

(2) 流域间, 从北到南, 坡耕地、林地 SOC 呈依次增加的趋势, 南部燕沟流域坡耕地、林地 SOC 较北部五分地沟流域分别高 13%、64.1%; 而草地 SOC

表现为先略有下降后又升高的趋势, 燕沟流域 SOC (0.73 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 最高, 但相较五分地沟(0.71 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 变化不大。

(3) 退耕还林 SOC 的增幅从北到南呈逐渐增加的趋势, 由五分地沟流域表层的 18.8% 变化到燕沟流域的 72.7%, 提高近 3 倍; 退耕还草 SOC 的增幅则相反, 自北到南从 32.1% 降低到 20.1%。这一变化特征与南北流域的生物因素(细根生物量)、土壤性质、土壤侵蚀强度密切相关。

(4) 亚表层退耕还林还草方式下 SOC 的增幅和表层的变化特征基本一致, 但均小于表层。

参考文献:

- [1] Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [2] Bouwman A F. Global distribution of the major soils and land cover types[M]. New York: John Wiley and Sons, 1990: 33-59.
- [3] Powers J S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in Northeastern Costa Rica[J]. *Ecosystems*, 2004, 7: 134-146.
- [4] Yang Y S, Xie J S, Sheng H, et al. The impact of land use/cover change on storage and quality of soil organic carbon in mid-subtropical mountainous area of Southern China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 62(11): 1123-1131.
- [5] Sheoran V, Sheoran A S, Poonia P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: A review[J]. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 2010, 3(2): 1-10.
- [6] Zhang K, Dang H, Tan S, et al. Change in soil organic carbon following the 'Grain-for-Green' programme in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 21(1): 13-23.
- [7] Wang S Q, Liu J Y, Yu G R, et al. Effects of land use change on the storage of soil organic carbon: A case study of the Qianyanzhou forest experimental station in China[J]. *Climatic Change*, 2004, 67(2-3): 247-255.
- [8] 傅伯杰, 郭旭东, 陈利顶, 等. 土地利用变化与土壤养分的变化: 以河北省遵化县为例[J]. *生态学报*, 2001, 21(6): 926-931.
- [9] FU Bo-jie, GUO Xu-dong, CHEN Li-ding, et al. Land use changes and soil nutrient changes: A case study in Zunhua County, Hebei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(6): 926-931.
- [9] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 544-550.
- JIANG Yong, ZHANG Yu-ge, LIANG Wen-ju, et al. Profile distribution and storage of soil organic carbon in an aquic brown soil as affected by land use[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 544-550.
- [10] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. *Environment International*, 2003, 29(4): 437-450.
- [11] Anderson D W, Jong E D, Verity G E, et al. The effects of cultivation on the organic matter of soils of the Canadian prairies[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 7: 1344-1345.
- [12] 李裕元, 邵明安, 郑继勇, 等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2279-2287.
- LI Yu-yuan, SHAO Ming-an, ZHENG Ji-yong, et al. Impact of grass-land recovery and reconstruction on soil organic carbon in the Northern

- Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2279–2287.
- [13] 彭文英, 张科利, 杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J]. 地域研究与开发, 2006, 25(3): 94–99.
PENG Wen-ying, ZHANG Ke-li, YANG Qin-ke. Forecast of impact of the returning farms to forests on soil organic carbon of Loess Plateau[J]. *Areal Research and Development*, 2006, 25(3): 94–99.
- [14] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 等. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 97–105.
MA Yu-hong, GUO Sheng-li, YANG Yu-lin, et al. The effects of vegetation types on soil organic carbon at Yangou catchment in the loess hilly-gully region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 97–105.
- [15] 潘竟虎, 董晓峰. 基于GIS与QuickBird影像的小流域土壤侵蚀定量评价[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 1–5.
PAN Jing-hu, DONG Xiao-feng. GIS-and-QuickBird-based quantitative assessment of soil erosion in small watershed[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(2): 1–5.
- [16] 刘国彬, 杨勤科, 郑粉莉. 黄土高原小流域治理与生态建设[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 11–15.
LIU Guo-bin, YANG Qin-ke, ZHENG Fen-li. Small watershed management and eco-rehabilitation on the Loess Plateau of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(1): 11–15.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 30–34.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 30–34.
- [18] 徐明祥, 王征, 张金, 等. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5405–5415.
XU Ming-xiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al. Response of soil organic carbon sequestration to the “Grain for Green Project” in the hilly Loess Plateau region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5405–5415.
- [19] 王春梅, 刘艳红, 邵彬, 等. 量化退耕还林后土壤碳变化[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 112–119.
WANG Chun-mei, LIU Yan-hong, SHAO Bin, et al. Quantifying the soil carbon changes following the afforestation of former arable land[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(3): 112–119.
- [20] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 223–229.
HAN Xin-hui, TONG Xiao-gang, YANG Gai-he, et al. Difference analysis of soil organic carbon pool in returning farmland to forest in loess hilly area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(12): 223–229.
- [21] Usman S, Singh S P, Rawat Y S, et al. Fine root decomposition and nitrogen mineralisation patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Himalaya[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 131: 191–199.
- [22] Zhang K R, Cheng X L, Dang H S, et al. Linking litter production, quality and decomposition to vegetation succession following agricultural abandonment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 8(5): 1–11.
- [23] Upson M A, Burgess P J. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system[J]. *Plant Soil*, 2013, 373(1–2): 43–58.
- [24] 郭忠升. 水资源紧缺地区土壤水分植被承载力论述[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 140–144.
GUO Zhong-sheng. A review of soil water carrying capacity for vegetation in water-limited regions[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(5): 140–144.
- [25] 刘建立, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山叠叠沟小流域典型坡面土壤水分的植被承载力[J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1101–1111.
LIU Jian-li, WANG Yan-hui, YU Peng-tao, et al. Vegetation carrying capacity based on soil water on typical slopes in the Diedieyou small watershed of Liupan Mountains, Northwestern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1101–1111.
- [26] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640–1647.
GUO Zhong-sheng, SHAO Ming-an. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1640–1647.
- [27] 成向荣, 黄明斌, 邵明安, 等. 紫花苜蓿和短花针茅根系分布与土壤水分研究[J]. 草地学报, 2008, 16(2): 171–175.
CHENG Xiang-rong, HUANG Ming-bin, SHAO Ming-an, et al. Root distribution and soil water dynamics of *Medicago sativa* L. and *Stipa breviflora* Griseb[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(2): 171–175.
- [28] 单长卷, 梁宗锁. 黄土高原刺槐人工林根系分布与土壤水分的关系[J]. 中南林学院学报, 2006, 26(1): 19–21.
SHAN Chang-juan, LIANG Zong-suo. Relationship between root distribution of Locust Plantation and soil water in the Loess Plateau[J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2006, 26(1): 19–21.
- [29] 席本野, 王焱, 贾黎明, 等. 宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 47–57.
XI Ben-ye, WANG Ye, JIA Li-ming, et al. Property of root distribution of triploid *Populus tomentosa* and its relation to root water uptake under the wide-and-narrow row spacing scheme[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 47–57.
- [30] Sala O E, Parton W J, Joyce L A, et al. Primary production of the central grassland region of the United States[J]. *Ecology*, 1988, 69(1): 40–45.
- [31] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423–436.
- [32] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 946–951.
WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun. Factors controlling soil organic carbon and total nitrogen densities in the upstream watershed of Miyun Reservoir, North China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(3): 946–951.
- [33] Homann P S, Kapchinske J S, Boyce A. Relations of mineral–soil C and N to climate and texture: Regional differences within the conterminous USA[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 303–316.
- [34] Bernard G B, Ernest K, Marie-Christine L L, et al. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils[J]. *Geoderma*, 2008, 143: 14–25.
- [35] Polyakov V O, Lal R. Soil organic matter and CO₂ emission as affected by water erosion on field runoff plots[J]. *Geoderma*, 2008, 143(1–2): 216–222.
- [36] Lal R. Soil erosion and carbon dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(2): 137–142.
- [37] Polyakov V, Lal R. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion[J]. *Environment International*, 2004, 30(4): 547–556.