

生态建设对坡面土壤有机碳分布的影响

王伟^{1,2}, 李占斌^{1,2,3}, 李鹏^{1,2}, 王飞超^{1,2}, 张祎^{1,2}

(1.西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048;

2.西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048;

3.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:生态建设工程是防治水土流失和恢复土壤肥力的重要措施, 研究生态建设工程对土壤有机碳及其组分的影响, 旨在揭示黄土高原不同恢复模式下有机碳的分布规律及土壤动态有机碳的影响因子。以黄土高原典型小流域塬沟为研究对象, 探讨了坡耕地、林—灌地、草地、梯田 4 种不同土地利用方式对土壤有机碳及土壤活性有机碳主要组分空间分布的影响。结果表明: (1) 坡耕地经生态建设后可以显著增加 0—20 cm 土层有机碳含量。林—灌地有机碳含量主要集中在 0—20 cm 土层深度的上坡位, 草地有机碳含量主要集中在 0—20 cm 土层深度的下坡位, 梯田有机碳含量主要集中在 0—20 cm 土层深度的上坡位。 (2) 相比于坡耕地, 林—灌地、草地和梯田在 0—20 cm 土层深度的易氧化有机碳含量有所减少, 但增加了 0—20 cm 土层深度的颗粒态有机碳、轻组有机碳和重组有机碳含量。 (3) 颗粒态有机碳对土地利用变化的敏感性强于有机碳及其主要组分(易氧化有机碳、轻组有机碳和重组有机碳), 因此, 颗粒态有机碳可以作为评估土地利用变化对土壤有机碳影响的良好指标。

关键词:生态建设; 塬沟; 坡位; 有机碳

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)02-0035-07

Effect of Ecological Construction on Soil Organic Carbon Distribution on Slope Land

WANG Wei^{1,2}, LI Zhanbin^{1,2,3}, LI Peng^{1,2}, WANG Feichao^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}

(1. Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Ecological construction project is an important measure to prevent soil erosion and restore soil fertility. The study on the influence of ecological construction project on soil organic carbon and its components aims to reveal the distribution rule of organic carbon and the influencing factors on soil dynamic organic carbon under different restoration modes on the Loess Plateau. The soil organic carbon and soil active organic carbon spatial distribution in the Nianyan watershed, a typical small watershed, on the Loess Plateau were studied. The results show that: (1) the organic carbon content of 0—20 cm soil layer can significantly increase in the sloping land after ecological construction; the organic carbon content of mainly concentrates in the upper slope of 0—20 cm soil depth in forest-bush land; the organic carbon content mainly concentrates in the downslope of 0—20 cm soil depth in the grassland; organic carbon content mainly concentrates in 0—20 cm soil in the terraces of the uphill position; (2) compared with sloping farmland, the contents of easily oxidizable organic carbon in the depth of 0—20 cm soil layer of forest-bush land, grassland and terraced fields reduce, but the contents of particulate organic carbon, light fraction of organic carbon and recombinant organic carbon in the depth of 0—20 cm increase; (3) granular organic carbon is more sensitive to land use change than organic carbon and its main components (easy to oxidize organic carbon, light organic carbon and recombinant organic carbon). Therefore, particulate organic carbon can be used as a good indicator of the

收稿日期: 2019-04-18

修回日期: 2019-05-07

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“基于能量过程的沟道工程侵蚀阻控机理研究”(51779204)

第一作者: 王伟(1986—), 男, 陕西延安人, 博士研究生, 研究方向为水土保持研究。E-mail: 360007519@qq.com

通信作者: 李占斌(1962—), 男, 河南南阳人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhanbinli@126.com

impact of land use changes on soil organic carbon.

Keywords: ecological construction; Nianyan watershed; slope position; organic carbon

近年来,全球气候变暖越来越受到人们的重视,潘根兴等^[1]认为土壤有机碳作为土壤重要的组成部分,不仅影响着土壤的质量,还对全球碳循环起着至关重要的作用。土地利用方式的变化不仅会直接对有机碳的储存和分布产生影响,还会通过影响有机碳的转化方式而间接影响有机碳的输入和周转,从而对全球碳循环产生影响^[2-5]。针对目前土地利用变化对碳循环的问题,首先需要探明有机碳在不同土地利用方式中的空间分布,但是利用总有机碳来衡量土地利用方式的变化对土壤碳动态的影响是不够全面的,因此,文雯等^[6]使用不同的方法将土壤有机碳分为不同的组分。张雪等^[7]研究发现土壤有机碳由活性有机碳和惰性有机碳构成,颗粒态有机碳、易氧化有机碳、轻组有机碳和重组有机碳是构成活性有机碳的主要成分。吕贻忠等^[8]认为土壤活性有机碳含量虽相对较小,但对土壤中的小变化十分敏感,可用作土壤有机碳早期阶段的评价指标。关于黄土高原有机碳及其组分的研究主要集中在特定的区域、土地利用方式以及施肥对其的影响。如:张金波等^[9]研究表明麦草覆盖可显著增加 0—60 cm 土壤总有机碳、轻质有机碳和可溶性有机碳含量;董云中等^[10]对晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量的研究结果表明 0—20 cm, 20—40 cm 和 40—60 cm 土层土壤有机碳密度大小均为杨树—小叶锦鸡儿(*Salicaceae-Caragana microphylla*)人工林>小叶锦鸡儿人工灌丛、杨树人工林和撂荒地>农田;俄胜哲等^[11]研究了对长期施肥对黄土高原黄绵土区小麦产量及土壤养分的影响,结果表明施用有机肥显著提高了土壤有机碳含量。黄土高原地形复杂、沟壑纵横,地形因子对不同土地利用方式土壤有机碳的影响报道较少。本文以黄土丘陵区生态建设小流域塄堰沟为研究对象,旨在研究坡耕地退耕还林、还草以及梯田建设对土壤有机碳及其组分的影响,并且探讨坡位因子对土壤有机碳空间分布的影响,相关研究结果为研究侵蚀景观中土壤有机碳库的动态变化具有重要的意义,这为合理布设水土保持措施提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

塄堰沟小流域位于榆林市绥德县王茂沟流域中,东经 110°20′04″,北纬 37°35′54″,平均海拔高度 1 107 m,年均降雨量为 513 mm,属于温带大陆季风气候。塄

堰沟小流域土地利用类型主要有坡耕地、林—灌地、草地和梯田。坡耕地主要种植玉米、红薯;林—灌地主要林木有松林,灌木主要有荆条;草地主要草种有白毛草;梯田种植苹果等经济作物。除坡耕地外,其他 3 种土地利用方式下人为干扰较少。

1.2 土壤样品采集与测定

2017 年 6 月在流域内进行土壤样品的采集。选取 4 种典型土地利用方式(坡耕地、林—灌地、草地、梯田),每种土地利用方式选取 3 条坡面,从坡顶到坡底每隔 10 m,通过挖剖面法在各样点处分层采集 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 的土壤样品,共采集 720 个土壤样品,带回实验室测定有机碳相关数据。

将采集回来的土壤样品进行风干研磨,之后将土壤样品过 100 目筛后装入自封袋,取土壤样品 1.000 g,滴入 1 mol/L 盐酸溶液并浸泡 24 h,从而除去样品中的无机碳,土壤样品中的有机碳含量采用 TOC 分析仪测定;颗粒态有机碳采用筛分法,Six 等^[12]通过湿筛法将土壤中大于 0.053 μm 的颗粒分离并浸泡在浓度为 1.6~1.8 g/cm³的重液中,然后通过震荡仪震荡分离土壤中的颗粒态有机碳,再通过六偏磷酸钠将分离出来的颗粒进行聚合,通过 0.53 μm 的筛子,便可得到团聚体中的颗粒有机碳;易氧化有机碳通常采用 KMnO₄ 氧化法测定,张雪等^[7]认为 KMnO₄ 氧化法的结果较为稳定,操作简单,运用较为广泛;轻组有机碳和重组有机碳通过密度相对法分离。

1.3 数据处理

数据整理计算采用 Excel 2010,相关性分析用 SPSS 24.0 的相应程序进行统计,图形绘制采用 Origin 2017。

各个组分有机碳分配比例以及敏感性指标的计算公式采用 Bremer 等^[13],如下:

$$A = B / \text{SOC} \times 100\% \quad (1)$$

式中:A 为活性有机碳的分配比例;B 为活性有机碳含量。

$$X = (M_{\max} - M_{\min}) / M_{\min} \quad (2)$$

式中:X 为不同有机碳组分敏感性指标; M_{\max} 为变量最大值; M_{\min} 为变量最小值。

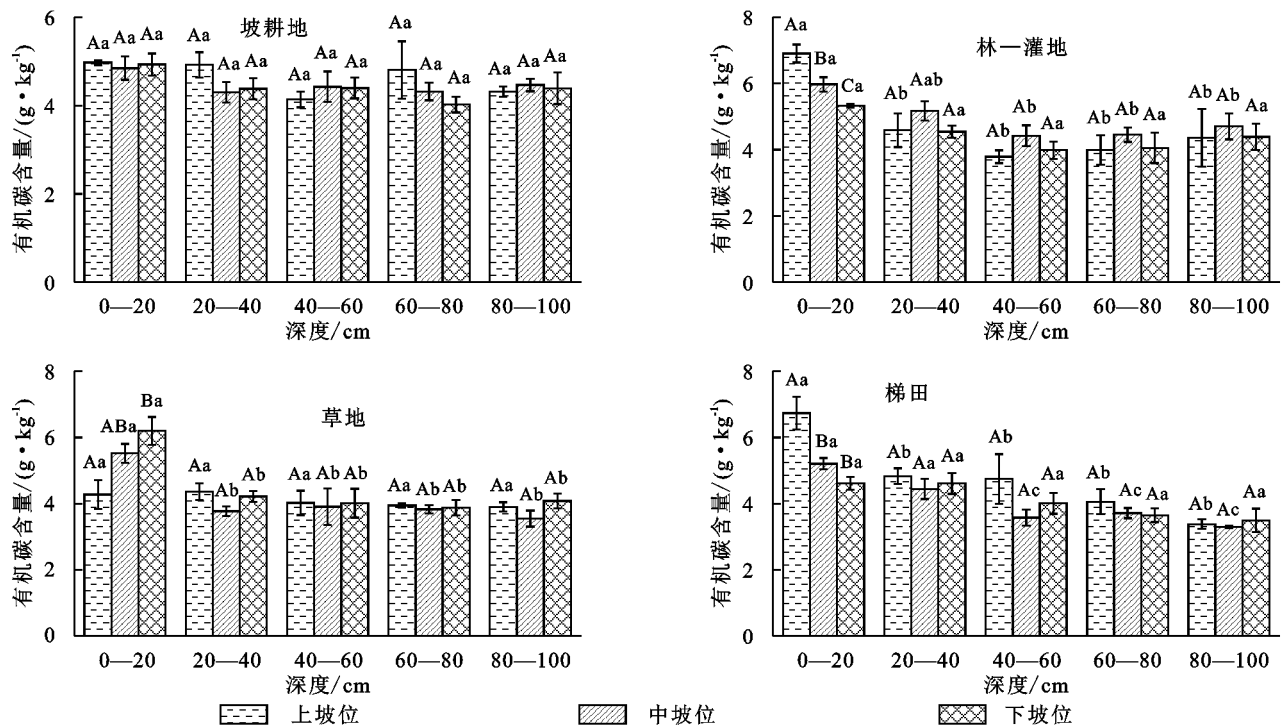
2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳空间分布

图 1 为 4 种土地利用方式下土壤总有机碳含量

空间分布图。由图 1 可知,林—灌地在 0—20 cm 土层深度处上坡位有机碳含量显著大于中坡位,中坡位有机碳含量显著大于下坡位($p < 0.05$),其他土层深度有机碳含量在不同坡位下差异不显著($p > 0.05$);同一坡位不同土层深度处,上坡位、中坡位和下坡位 0—20 cm 土层深度有机碳含量显著高于其他土层深度有机碳含量($p < 0.05$)。说明林—灌地有机碳主要集中在 0—20 cm 土层深度的上坡位。草地就总体而言,0—20 cm 土层深度处下坡位有机碳含量显著高于上坡位和中坡位($p < 0.05$),其他土层深度有机碳含量在不同坡位下差异不显著($p > 0.05$);

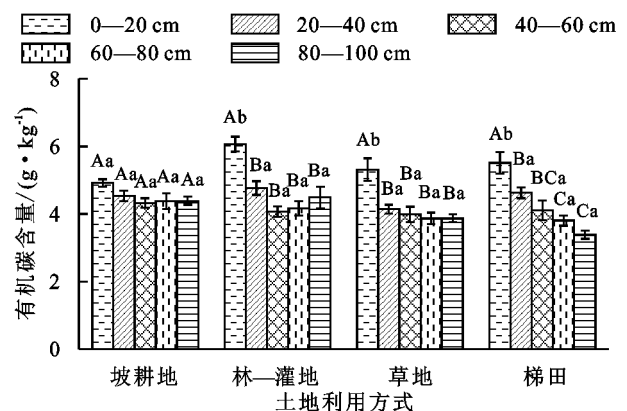
同一坡位不同土层深度处,中坡位和下坡位土壤有机碳含量在 0—20 cm 土层深度处显著高于其他土层深度有机碳含量($p < 0.05$)。说明草地土壤有机碳主要集中在 0—20 cm 处的下坡位。梯田上坡位有机碳含量在 0—20 cm 土层深度处显著高于中坡位和下坡位($p < 0.05$);同一坡位不同土层深度处,土壤有机碳含量在上坡位和中坡位的 0—20 cm 处显著高于其他土层深度有机碳含量($p < 0.05$)。说明梯田有机碳主要集中在 0—20 cm 土层深度的上坡位。坡耕地与林—灌地、草地、梯田相比,有机碳总体分布均匀,没有明显的富集现象。



注:不同大写字母表示在相同土层深度下不同坡位的有机碳含量在 5% 水平上的差异性,不同小写字母表示在相同坡位下不同土层深度的有机碳含量在 5% 水平上的差异性。

图 1 不同土地利用下土壤总有机碳的空间分布

总体来看(图 2),4 种土地利用方式下,坡耕地有机碳含量变化范围为 3.65~5.12 g/kg,林—灌地有机碳含量变化范围为 2.77~7.63 g/kg,草地有机碳含量变化范围为 3.00~6.90 g/kg,梯田有机碳变化范围为 2.94~5.60 g/kg。同一深度,不同土地利用下土壤有机碳含量存在差异,在 0—20 cm 土层中,土壤有机碳含量大小依次为林—灌地(6.07 g/kg)>梯田(5.52 g/kg)>草地(5.31 g/kg)>坡耕地(4.92 g/kg),坡耕地与其他 3 种土地利用方式有机碳含量差异显著($p < 0.05$)。在 20—40 cm 土层中,林—灌地土壤有机碳含量最高,达到了 4.77 g/kg,且 4 种土地利用方式下的土壤有机碳含量差异不显著($p > 0.05$)。在 40—60 cm, 60—80 cm 以及 80—100 cm 这 4 种土地利用方式下土壤有机碳含量差异均均不显著。

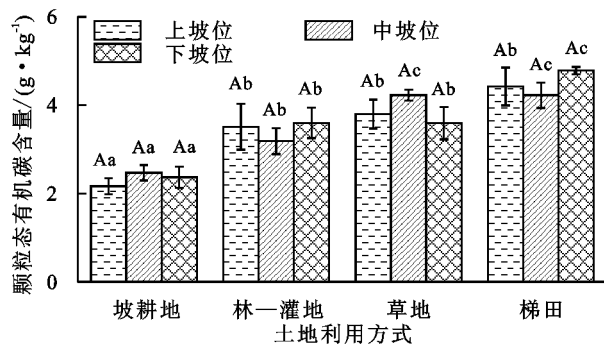


注:不同大写字母表示在相同土地利用方式下不同深度的有机碳含量在 5% 水平上的差异性,不同小写字母表示在相同深度下不同土地利用方式的有机碳含量在 5% 水平上的差异性。

图 2 不同土地利用方式下 0—100 cm 土壤有机碳含量变化

2.2 土壤活性有机碳组分空间分布

2.2.1 颗粒态有机碳 由图3可知,颗粒态有机碳在同一土地利用方式下的不同坡位差异不显著($p>0.05$)。在上坡位处,林—灌地(3.51 g/kg)、草地(3.80 g/kg)、梯田(4.42 g/kg)颗粒态有机碳含量分别是坡耕地(2.16 g/kg)的1.63,1.76,2.05倍;在中坡位处,草地(4.22 g/kg)和梯田(4.21 g/kg)颗粒态有机碳含量显著高于坡耕地(2.47 g/kg);在下坡位处,梯田颗粒态有机碳含量(4.79 g/kg)>林—灌地(3.60 g/kg)>草地(3.59 g/kg)>坡耕地(2.37 g/kg)。



注:不同大写字母表示相同土地利用方式下不同坡位的颗粒态有机碳含量在5%水平上的差异性,不同小写字母表示相同坡位不同土地利用方式下的颗粒态有机碳含量在5%水平上的差异性。

图3 颗粒态有机碳空间分布

从图4可以看出,林—灌地、草地、梯田颗粒态有机碳含量与坡耕地相比均显著增加($p<0.05$)。颗粒态有机碳含量为梯田(4.49 g/kg)>草地(3.91 g/kg)>林—灌地(3.38 g/kg)>坡耕地(2.31 g/kg),较坡耕地分别增加了1.94,1.69,1.46倍。坡耕地转变为林—灌地、草地、梯田后,使土壤颗粒态有机碳含量在0—20 cm土层显著增加。

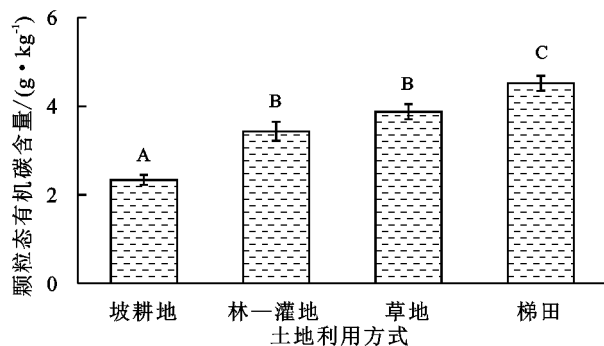
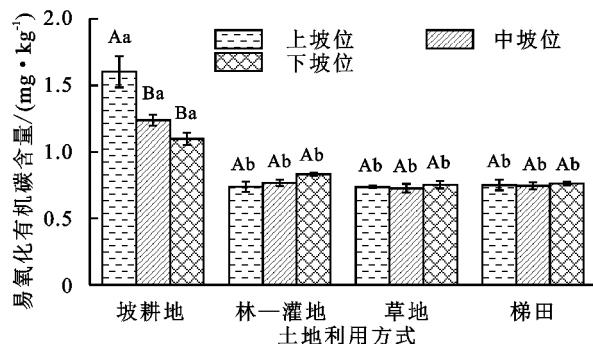


图4 不同土地利用方式下颗粒态有机碳含量

2.2.2 易氧化有机碳 由图5可知,坡耕地上坡位易氧化有机碳含量显著高于中坡位和下坡位易氧化有机碳含量($p<0.05$)。在上坡位,坡耕地易氧化有机碳含量(1.60 mg/kg)是林—灌地(0.74 mg/kg)、草地(0.74 mg/kg)和梯田(0.75 mg/kg)易氧化有机碳含量的2.16,2.16,2.13倍;在中坡位,坡耕地易氧化有机碳含量(1.24 mg/kg)是林—灌地(0.77 mg/kg)、

草地(0.73 mg/kg)和梯田(0.74 mg/kg)易氧化有机碳含量的1.61,1.70,1.68倍;在下坡位,坡耕地易氧化有机碳含量(1.10 mg/kg)是林—灌地(0.83 mg/kg)、草地(0.75 mg/kg)和梯田(0.76 mg/kg)易氧化有机碳含量的1.33,1.47,1.45倍。



注:不同大写字母表示相同土地利用方式下不同坡位的易氧化有机碳含量在5%水平上的差异性,不同小写字母表示相同坡位不同土地利用方式下的易氧化有机碳含量在5%水平上的差异性。

图5 易氧化有机碳空间分布

如图6所示,林—灌地、草地和梯田易氧化有机碳含量与坡耕地相比均显著减小($p<0.05$)。坡耕地易氧化有机碳含量(1.31 mg/kg)较林—灌地(0.77 mg/kg)、草地(0.73 mg/kg)、梯田(0.75 mg/kg)易氧化有机碳含量分别上升了41%,44%,43%。坡耕地转变为林—灌地、草地、梯田后,使得0—20 cm土层深度的易氧化有机碳含量减小。

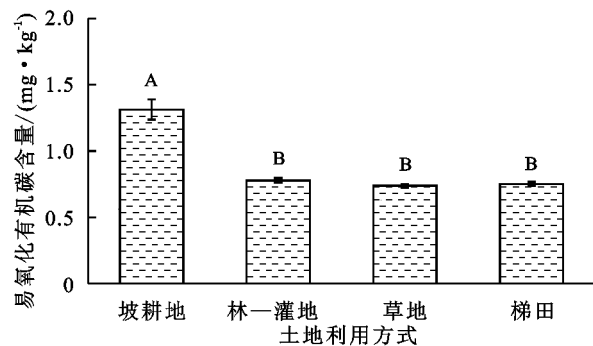


图6 不同土地利用方式下易氧化有机碳含量

2.2.3 轻组有机碳 由图7可知,仅林—灌地上坡位轻组有机碳含量显著高于中坡位和下坡位($p<0.05$)。在上坡位和中坡位,梯田轻组有机碳含量显著高于坡耕地、林—灌地和草地($p>0.05$),在下坡位,林—灌地、草地和梯田轻组有机碳含量均显著高于坡耕地轻组有机碳含量($p<0.05$)。

如图8所示,林—灌地、草地和梯田轻组有机碳含量与坡耕地相比均显著增加($p<0.05$)。轻组有机碳含量为梯田(1.23 g/kg)>草地(0.86 g/kg)>林—灌地(0.71 g/kg)>坡耕地(0.58 g/kg),分别增加了1.22,1.48,2.12倍。坡耕地转变为林—灌地、草地、梯田后,使得0—20 cm土层深度的轻组有机碳含量增加。

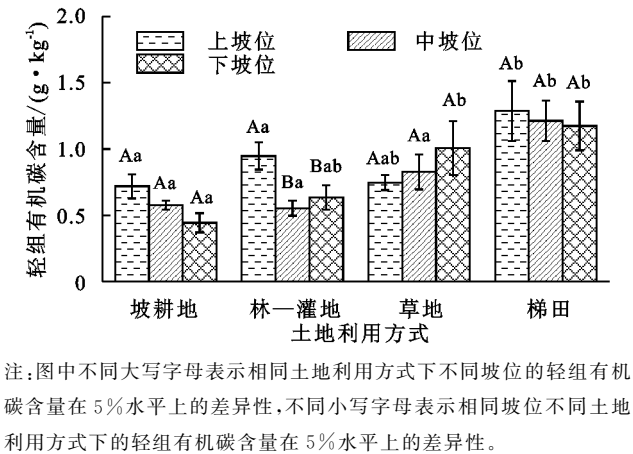


图7 轻组有机碳空间分布

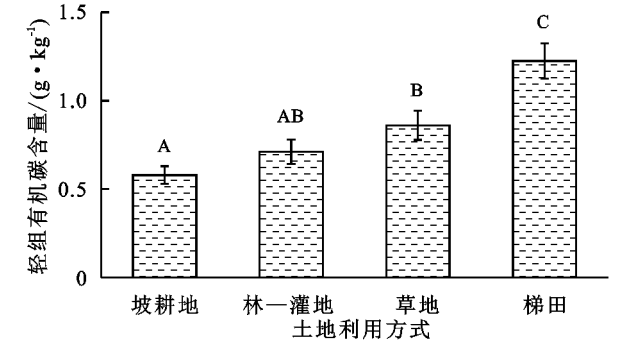
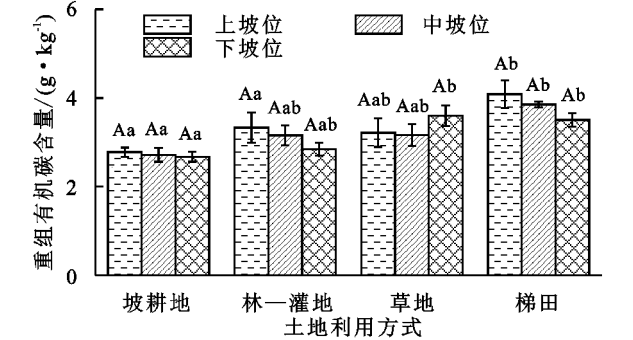


图8 不同土地利用方式下轻组有机碳含量

2.2.4 重组有机碳 由图9可知,坡耕地、林—灌地、草地和梯田重组有机碳含量在上坡位、中坡位和下坡位均无显著差异($p>0.05$)。在上坡位和中坡位,梯田重组有机碳含量显著大于坡耕地、林—灌地和坡耕地($p<0.05$)。在下坡位,梯田和草地重组有机碳含量显著大于坡耕地和林—灌地重组有机碳含量($p<0.05$)。



注:图中不同大写字母表示相同土地利用方式下不同坡位的重组有机碳含量在5%水平上的差异性,不同小写字母表示相同坡位不同土地利用方式下的重组有机碳含量在5%水平上的差异性。

图9 重组有机碳空间分布

由图10可知,林—灌地、草地和梯田重组有机碳含量与坡耕地相比均显著增加($p<0.05$)。重组有机碳含量为梯田(3.81 g/kg)>草地(3.33 g/kg)>林—灌地(3.11 g/kg)>坡耕地(2.72 g/kg),分别增加了1.14,1.22,1.40倍。坡耕地转变为林—灌地、草地、

梯田后,可以使得0—20 cm土层深度的重组有机碳含量增加。

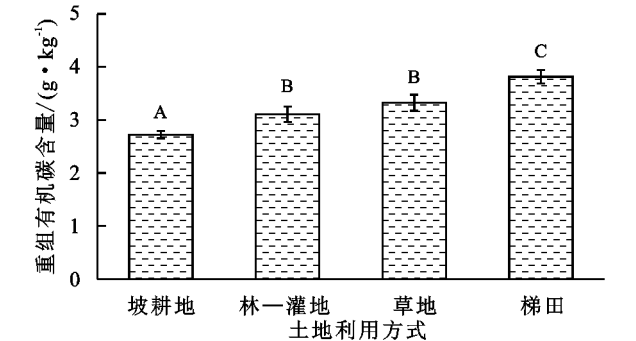


图10 不同土地利用下重组有机碳含量

2.3 土壤总有机碳与活性有机碳含量敏感性分析

Garten等^[14]认为用总的有机碳含量来评价不同土地利用方式对土壤动态有机碳的变化是非常困难的,因此,王琳等^[15]认为对不同土地利用方式或管理措施变化更为敏感的有机碳组分可以作为响应土壤有机碳和土地质量变化的早期指标。本文以有机碳及其主要组分(颗粒态有机碳、易氧化有机碳、轻组有机碳和重组有机碳)作为土壤动态有机碳含量变化的敏感性指标。

表1为不同土地利用方式0—100 cm土层深下有机碳及其组分的敏感性分析,可以看出,在不同深度处,颗粒态有机碳的含量对土地利用变化的响应最为明显,大于其他有机碳组分。在整个0—100 cm土层深度内,不同有机碳组分对土地利用变化的敏感性依次为颗粒态有机碳(16.11)>轻组有机碳(7.07)>有机碳(1.22)>重组有机碳(1.18)>易氧化有机碳(1.14),表明颗粒态有机碳对土地利用的改变最为敏感,而易氧化有机碳对坡面景观改变的敏感性最差,因此,颗粒态有机碳可以作为评价不同土地利用方式下土壤动态有机碳变化的良好指标。

表1 不同有机碳组分敏感性指标的大小

土层深度/cm	有机碳	颗粒态有机碳	易氧化有机碳	轻组有机碳	重组有机碳
0—20	1.38	23.90	0.92	9.56	0.84
20—40	1.14	26.18	0.92	11.68	0.97
40—60	1.28	12.31	2.03	6.32	1.82
60—80	1.15	8.20	0.91	4.56	1.03
80—100	1.17	9.97	0.92	3.21	1.22
平均值	1.22	16.11	1.14	7.07	1.18

3 讨论

赵锐锋等^[16]认为土壤有机碳作为土壤重要的组成部分,在大的区域尺度上主要受气候、成土母质等影响,但在小的区域上,在气候、母质等基本一致的情

况下,其主要受土地利用方式、地形等条件的影响。土地利用方式及管理措施都会对有机碳的分布产生一定的影响。本研究结果表明除坡耕地外,林—灌地、草地和梯田土壤有机碳含量随着深度的增加而降低,这与张祎等^[17]研究黄土丘陵区小流域生态恢复对土壤有机碳和全氮的影响结果相一致。坡耕地转变为林—灌地、草地和梯田后使得土壤有机碳含量在 0—20 cm 土层深度处显著增加。周莉等^[18]认为林—灌地、梯田凋落物等外源碳聚集在土壤中,经过淋溶和分解作用增加了土壤有机碳储量。刘梦云等^[19]研究发现草地的茎叶腐烂可以增加土壤有机碳含量,同时,草本植物的根以细根居多,一般分布在土壤的表层,这些因素导致其腐烂较快,增加了 0—20 cm 土层有机碳含量。坡耕地人为经常翻种,使得土壤破碎化程度较高、质地稀疏,从而在水土流失过程中失去了大量的有机碳,同时,富含有机碳的农产品不能归还到土壤中,因此,坡耕地保护和储存有机碳的能力相对较低。通过研究土地利用方式的不同对土壤有机碳储量的变化是准确预测土壤有机碳在全球气候变暖的 CO₂ 源和汇的关键。将坡耕地恢复为林—灌地、草地和梯田可以显著增加有机碳储量,相应加强土壤碳汇的能力,增加区域碳储量。

4 种土地利用方式下土壤活性有机碳的分配比例见表 2。Lehmann 等^[20]发现颗粒态有机碳是土壤团聚体积累和保护的那部分有机碳。颗粒态有机碳分配比例在研究区不同土地利用方式下的分配比例介于 45.7%~83.7%,林—灌地、草地和梯田颗粒态有机碳含量显著高于坡耕地。罗友进等^[21]的研究发现林—灌地、草地和梯田,由于植被覆盖和人为干扰减少的原因,使得土壤环境得到有效的恢复,从而使土壤团聚体破坏减小,颗粒态有机碳得到了有效的保护。同时,植被的枯枝落叶经过腐烂可以有效地补充土壤有机碳,地下的植物根系经过微生物的分解也是土壤有机碳的来源之一。于建光等^[22]认为颗粒态有机碳易被土壤微生物利用,因此其周转速度较快,可以作为土壤碳库变化的敏感指标。本研究中颗粒态有机碳对不同土地利用方式的敏感性最大,这与张金波等^[9]研究结果一致。张仕吉等^[23]研究发现土壤有机碳库的活性与易氧化有机碳的含量相关,总有机碳中易氧化有机碳的比例越高,有机碳活性就越大。本研究中易氧化有机碳占总有机碳的比例介于 14.2%~25.4%,林—灌地、草地和梯田的易氧化有机碳含量显著低于坡耕地的易氧化有机碳含量。石亚攀等^[24]对红松阔混交林林隙土壤总有机碳和易氧化有机碳的时空异质性研究表明,易氧化有机碳含量和有机

碳含量呈显著正相关关系。但在本研究中易氧化有机碳含量并没有随着有机碳含量的增加而增加,究其原因可能是坡耕地由于人为的影响使得土壤团聚体被破坏,从而释放了被储存和保护在团聚体中的有机碳,进一步转变为易氧化有机碳。因此使得坡耕地的易氧化有机碳含量较林—灌地、草地和梯田增多。沈宏等^[25]通过对土壤活性有机碳的表征及其生态效应的研究发现土壤易氧化有机碳可以指示土壤有机质的早期变化。本研究中易氧化有机碳对土地利用方式的敏感性较低,这可能是由于黄土高原特定的土质导致易氧化有机碳的稳定性相对较差,同时,Vieira 等^[26]认为运用化学氧化法测定易氧化有机碳的含量可能会造成土壤大团聚体内部的活性有机质未被氧化。吴建国等^[27]认为轻组有机碳属于非保护性碳,它占有机碳的比例越高,有机碳越不稳定,因而不利于土壤有机碳的储存和保护;土壤重组有机碳属于保护性碳,它占有机碳的比例越高,有机碳越稳定,因而有利于土壤有机碳的积累和保护。本研究中轻组有机碳和重组有机碳占总有机碳的比例分别为 10.4%~24.2%和 52.1%~71.2%。张宏等^[28]认为轻组有机碳大多来源于地上凋落物,更容易受到植物的影响,因此它也是指示不同土地利用方式的重要指标。本研究中轻组有机碳对土地利用方式的敏感性仅次于颗粒态有机碳。同时,魏云敏等^[29]认为重组有机碳稳定性较强,因此其对土地利用方式的变化敏感性较低。综上,坡耕地经生态建设后可显著提高颗粒态有机碳含量,同时,颗粒态有机碳不同土地利用方式最为敏感。

表 2 活性有机碳的分配比例				%
类型	颗粒态 有机碳	易氧化 有机碳	轻组 有机碳	重组 有机碳
坡耕地	45.7Aa	25.4Ab	10.4Ac	52.1ABd
林—灌地	56.8Ba	14.2Bb	11.6Ab	61.3Aa
草地	76.3Ba	15.2Bb	15.8Ab	66.2BCa
梯田	83.7Ba	13.8Bb	24.1Bb	71.2Cc

注:表中大字母表示同一类型活性有机碳不同土地利用条件下活性有机碳分配比例在 5%水平上的差异性;小写字母表示同一土地利用条件不同活性有机碳分配比例在 5%水平上的差异性。

4 结 论

(1) 坡耕地经生态建设后可以显著增加 0—20 cm 土层有机碳含量。林—灌地有机碳含量主要集中在 0—20 cm 土层深度的上坡位,草地有机碳含量主要集中在 0—20 cm 土层深度的下坡位,梯田有机碳含量主要集中在 0—20 cm 土层深度的上坡位。

(2) 相比于坡耕地,林—灌地、草地和梯田在 0—

20 cm 土层深度的易氧化有机碳含量有所减少,但增加了 0—20 cm 土层深度的颗粒态有机碳、轻组有机碳和重组有机碳含量。

(3) 颗粒态有机碳对土地利用变化比有机碳及其主要组分(易氧化有机碳、轻组有机碳和重组有机碳)更为敏感,因此,颗粒态有机碳可以作为评估土地利用变化对土壤有机碳影响的良好指标。

参考文献:

- [1] 潘根兴,周萍,李恋卿,等.固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J].土壤学报,2007,44(2):327-337.
- [2] 张笑培,杨改河,王和洲,等.植被恢复土壤抗蚀性响应及其评价研究[J].农业现代化研究,2010,31(3):353-355.
- [3] Zhang J, Quine T A, Ni S, 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.
- [4] Vandenbygaert A J. Erosion and deposition history derived by depth-stratigraphy of ^{137}Cs and soil organic carbon[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001,61(3/4):187-192.
- [5] Stavi I, Lal R. Variability of soil physical quality in uneroded, eroded, and depositional cropland sites[J]. *Geomorphology*, 2011,125(1):85-91.
- [6] 文雯,周宝同,汪亚峰,等.黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应[J].生态学报,2015,35(18):6060-6069.
- [7] 张雪,韩士杰,王树起,等.白桦林不同演替阶段土壤有机碳组分的变化[J].生态学杂志,2016,35(2):282-289.
- [8] 吕贻忠,廉晓娟,赵红,等.保护性耕作模式对黑土有机碳含量和密度的影响[J].农业工程学报,2010,26(11):163-169.
- [9] 张金波,宋长春.土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J].生态环境,2003,12(4):500-504.
- [10] 董云中,王永亮,张建杰,等.晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量[J].应用生态学报,2014,25(4):955-960.
- [11] 俄胜哲,杨志奇,罗照霞,等.长期施肥对黄土高原黄绵土区小麦产量及土壤养分的影响[J].麦类作物学报,2016,36(1):104-110.
- [12] Six J, Guggenberger G. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001,52(4):607-618.
- [13] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994,74(2):131-138.
- [14] Garten C T, Wullschlegel S D. Soil carbon inventories under a bioenergy crop (Switchgrass): Measurement limitations[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(4):1359-1365.
- [15] 王琳,李玲玲,高立峰,等.长期保护性耕作对黄绵土总有机碳和易氧化有机碳动态的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(9):1057-1063.
- [16] 赵锐锋,张丽华,赵海莉,等.黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J].地理科学,2013,33(3):363-370.
- [17] 张祎,任宗萍,李鹏,等.黄土丘陵区小流域生态恢复对土壤有机碳和全氮的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):97-103.
- [18] 周莉,李保国,周广胜.土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J].地球科学进展,2005,20(1):99-105.
- [19] 刘梦云,付东磊,常庆瑞,等.黄土台塬不同土地利用方式对土壤有机碳氧化稳定性及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(12):2415-2424.
- [20] Lehmann J, Cravo M D S, Zech W. Organic matter stabilization in a Xanthic Ferralsol of the central Amazon as affected by single trees: chemical characterization of density, aggregate, and particle size fractions[J]. *Geoderma*, 2001,99(1/2):147-168.
- [21] 罗友进,魏朝富,李渝,等.土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J].生态学报,2011,31(1):257-266.
- [22] 于建光,李辉信,胡锋,等.施用秸秆及接种蚯蚓对土壤颗粒有机碳及矿物结合有机碳的影响[J].生态环境,2006,15(3):606-610.
- [23] 张仕吉,项文化,孙伟军,等.中亚热带土地利用方式对土壤易氧化有机碳及碳库管理指数的影响[J].生态环境学报,2016,25(6):911-919.
- [24] 石亚攀,陈立新,段文标,等.红松针阔混交林林隙土壤总有机碳和易氧化有机碳的时空异质性研究[J].水土保持学报,2013,27(6):186-192.
- [25] 沈宏,曹志洪,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.
- [26] Vieira F C B, Bayer C, Zanatta J A, et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(1/2):195-204.
- [27] 吴建国,张小全,王彦辉,等.土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J].林业科学,2002,38(4):19-29.
- [28] 张宏,黄懿梅,安韶山,等.黄土高原森林带植被群落下土壤活性有机碳研究[J].水土保持研究,2013,20(3):65-70,77.
- [29] 魏云敏,胡海清,孙家宝,等.不同强度火烧对轻组和重组有机碳的影响[J].安徽农业科学,2014,42(18):5840-5843.