

黄土丘陵区人工柠条恢复为主小流域土壤 有机碳空间变异性及其影响因素

栗文玉, 刘小芳, 赵勇钢, 高 冉, 杜雨佳, 张星星

(山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041000)

摘 要:柠条是黄土丘陵区人工植被恢复生态环境的重要树种。为进一步研究大面积种植柠条对小流域土壤有机碳空间分布的影响,选择人工柠条种植为主的宁夏固原市上黄村火岔湾小流域为研究区域,分析了其土壤有机碳的空间变异特征及其影响因素。基于野外取样和室内分析,利用地统计学和 ArcGIS 空间分析,分析了小流域 0—40 cm 土层土壤有机碳的空间分布与变异性,不同土地利用方式以及地形和整地方式等对其的影响。结果表明:(1)不同土地利用方式对小流域土壤有机碳含量有显著影响,表现为林地>灌木地>农地>草地,分布范围为 8.78~29.81 g/kg,变异系数为 19.03%~21.80%,属中等程度变异。(2)小流域各土层有机碳的最优拟合模型均为球面模型,具有强烈的空间分布相关性,并以结构性因素引起的变异为主。(3)小流域土壤有机碳含量呈斑块状空间分布,以人工种植柠条为主的区域整体土壤有机碳含量较高。(4)坡位和整地方式对整个小流域土壤有机碳含量有显著影响($p < 0.05$),地形对不同土地利用方式的有机碳含量影响不大,但整地方式对柠条灌丛地土壤有机碳含量有显著影响($p < 0.05$)。研究结果总体说明,以人工柠条种植为主的植被恢复方式促进了黄土丘陵区小流域土壤有机碳的积累,但小流域土壤有机碳空间分布及其变异性也受土地利用方式及其坡位和整地方式的重要影响。在实际区域土壤有机碳研究中有必要将整地方式和植被类型相结合进行综合研究。

关键词:土壤有机碳;地统计学;柠条;地形;整地方式

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0015-08

Spatial Variability of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in an Artificial *Caragana korshinskii* Dominated Small Watershed in the Hilly Region of the Loess Plateau

LI Wenyu, LIU Xiaofang, ZHAO Yonggang, GAO Ran, DU Yujia, ZHANG Xingxing

(College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China)

Abstract: *Caragana korshinskii* is an important plant species in loess hill-gully area to restore ecological environment. To further understand the effect of large-area plantation with *Caragana korshinskii* on the spatial distribution of soil organic carbon in small watershed, Huochawan watershed in Shanghuang Village, Guyuan City, Ningxia was selected as the research site to analyze the spatial variation characteristics of soil organic carbon and its influencing factors. Based on field sampling and laboratory testing, the Geo-statistics and ArcGIS spatial analysis techniques were used to study the spatial distribution and variability of soil organic carbon in 0—40 cm soil layer. The results showed that: (1) the differences of average soil organic carbon among different land uses reached the remarkable level, the average content of soil organic carbon decreased in the order: forestland>shrub land>farmland>grassland, the soil organic carbon content ranged from 8.78 g/kg to 29.81 g/kg, and the coefficient of variation was between 19.03% and 21.80%, which belonged to intermediate variability; (2) the best theoretical models of soil organic carbon in each soil layer in the small watershed are spherical models, which presented the strong spatial distribution correlation, and

收稿日期:2019-05-13

修回日期:2019-06-06

资助项目:山西省自然科学基金(201601D021103);国家自然科学基金(41401242)

第一作者:栗文玉(1993—),女,山西晋中人,硕士研究生,研究方向为恢复生态研究。E-mail:1508291695@qq.com

通信作者:刘小芳(1981—),女,山西榆次人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事植物生态研究。E-mail:liuxiaofang04@163.com

the spatial variability of soil organic carbon pool was mainly caused by structural factors; (3) the soil organic carbon content in the small watershed presented a polygon spatial distribution, and the overall soil organic carbon content in the region dominated by the plantation *Caragana korshinskii* was high; (4) slope position and microtopography had the significant effect on soil organic carbon in small watershed ($p < 0.05$), while only microtopography had a significant effect on shrub land ($p < 0.05$). In general, the accumulation of soil organic carbon is being enhanced by the cultivation of *caragana korshinskii*, but at the same time the microtopography land preparation method has an important impact on the spatial variability of soil organic carbon. It is necessary to study soil organic carbon by comprehensively considering the combination of the land preparation method with vegetation type in the actual region.

Keywords: soil organic carbon; geostatistics; *Caragana korshinskii*; terrain; land preparation method

黄土高原地区水土流失严重,是我国典型的生态环境脆弱地区之一^[1]。近几十年来,通过退耕还林(草)、小流域综合治理等生态环境工程的整治,黄土高原区域生态功能已得到大幅提升。土壤有机碳库作为陆地生态系统碳库的主要组成,其动态变化在全球碳循环中具有重要作用^[2-4]。许多研究证明,黄土高原退耕还林(草)工程提升了区域的土壤有机碳库,其中人工植被恢复起着重要的作用^[5-6]。小流域是黄土高原生态环境治理的基本单元。相较于大尺度,小流域尺度上的研究会更准确地反映出土壤有机碳的空间变异^[7]。因此,研究小流域土壤有机碳的空间变异性并辨析其影响因素,对于退耕还林(草)工程在小流域尺度下的水土保持效益和生态服务功能评价具有重要意义。

由于黄土高原小流域地貌的复杂性和土壤自身的高异质性,加之受到各种人类活动和自然因素的影响,其有机碳分布具有高度的空间变异性^[8]。Shi 等^[1]认为黄土高原丘陵小流域土地利用变化使得土壤有机碳在小流域中进行重新分配,并且 0—20 cm 土层中有机碳含量会显著高于下层。贾宇平等^[3]研究了黄土丘陵沟壑区小流域的有机碳分布的空间变异特征得出该流域有机碳含量为中等变异程度,而沟壑地土壤有机碳含量比梁峁地的高,且土壤有机碳含量在空间上的分布主要受土壤动植物在土体中的分布、土壤含水量、水土流失情况及人类生产活动等因素的影响。魏孝荣等^[9]认为地形条件是影响黄土高原沟壑区小流域土壤性质空间分布的主要因素。孙文义等^[10]认为不同地形和土地利用方式都会对黄土丘陵沟壑区小流域表层土壤有机碳空间分布产生显著影响。Sun 等^[11-12]认为地形位置、海拔、坡度、坡向等地形因素会影响土壤有机碳的分布和含量。总体来看,由于区域气候、地貌、植被、土壤和人为活动等因素具有较大差异性,小流域土壤有机碳空间变异性的研究结果也不尽相同,仍有必要进行进一步的研究。

人工植被恢复是黄土丘陵区生态环境建设的主要举措,其中柠条(*Caragana Korshinskii*)是主要的灌木树种之一。柠条由于其具有较强的抗逆性和固土保水能力,同时也是优质的饲料植物资源,已在宁夏、陕北、晋西、甘肃等地大面积种植^[13-14]。许多区域已形成以柠条种植为主导的植被配置格局,加之恢复过程中多辅以微地形整地方式,多因素影响下的小流域土壤有机碳分布空间变异特征仍是值得研究的重要问题。因此,本研究选择以人工柠条种植为主导恢复方式的宁夏火岔湾小流域为对象,研究其土壤有机碳空间变异特征,分析土壤有机碳产生空间异质性的影响因素,以期为黄土丘陵区植被恢复与重建以及区域碳库的评估提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择位于宁夏回族自治区固原市原州区中国科学院水利部水土保持研究所上黄生态试验站附近的火岔湾小流域(106°26′50.515″—106°27′16.513″E, 35°59′55.619″—36°1′9.074″N),该区地处黄土高原宽谷丘陵沟壑区(图 1)。流域面积约为 0.85 km²,海拔高度为 1 615~1 753 m,多年平均气温和降水量分别为 6.9℃和 419.1 mm,属温带半干旱气候区。土壤类型主要为黄土母质上发育的黄绵土。该流域主要有灌木地、农地、草地和林地 4 种土地利用方式,分别占流域总面积的 49.02%,15.47%,11.57%,9.53%。各样地概况信息详见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 土样采集 以火岔湾小流域土地利用图和地形图为参照,采用网格法同时结合实际土地利用方式和地形特征进行布点设计和采样,网格间距为 150 m×150 m,用 GPS 记录每个样点的地理坐标信息,共采集 50 个样点(图 1)。每个样点设置水平距离约 10 m 的 3 个采样小区,在每个小区挖 40 cm 深的土壤剖面,并按照 0—

10,10—20,20—30,30—40 cm 共 4 个层次进行取土,每个样点所取同一层土样组成混合样。采集土样带回实验室自然风干,挑拣出植物根系及动物残体后,研磨过 0.15 mm 筛,用于土壤有机碳含量的测定。土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法进行测定^[15]。

1.2.2 数据处理与方法 利用 SPSS 17.0 软件对土壤有机碳含量数据进行描述性统计分析,利用变异系数(CV)分析数据的离散程度,其值为≤10%,10%~100%和≥100%时,分别表示研究变量具有弱、中等和强变异性^[16]。用 ANVOA 方差分析法分析不同土地利用方式、不同土层深度和不同地形条件下土壤有机碳含量的差异显著性。将数据进行 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验,将服从正态分布的数据进行地统计学分析,若不符合正态分布则需进行对数转换或博克斯—考克斯转换。地统计学中的空间变异分析常利用半方差函数进行计算,其公式为^[17]:

$$r(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2$$
 (1)

式中: h 为两样本点空间分隔距离; $r(h)$ 为半方差函数值; $N(h)$ 是间隔距离等于 h 的样本点的对数; $Z(x_i)$ 为空间位置点 x_i 处指标的实测值; $Z(x_i+h)$ 为空间位置点 x_i+h 处指标的实测值。

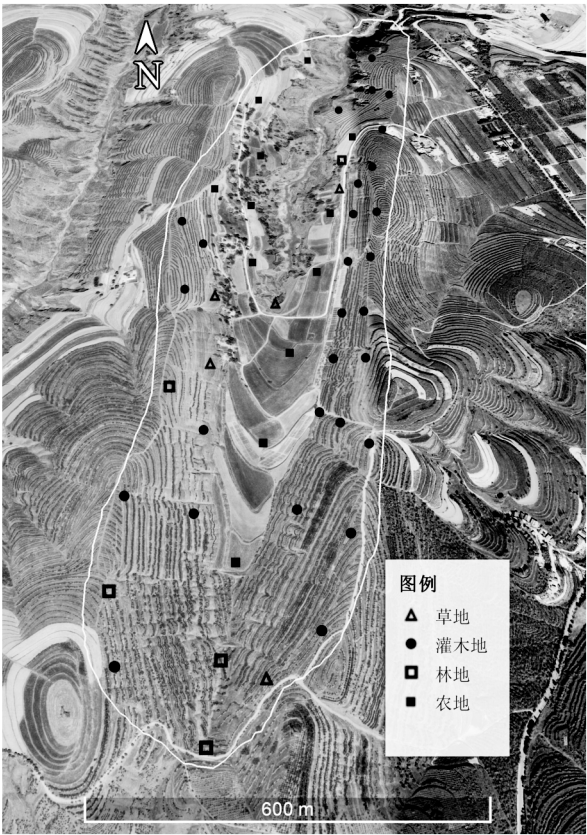


图 1 火岔湾小流域采样点分布

表 1 样地概况

样地	样点数	整地方式	坡位	坡向	主要植被
草地	5	坡地(5)	坡上(1)	半阴坡(2) 半阳坡(3)	大针茅、铁杆蒿、百里香等
			坡中(2)		
			坡下(2)		
农地	12	梯田(12)	坡上(1)	半阴坡(3)	玉米、马铃薯等
			坡下(11)	半阳坡(9)	
灌木地	28	水平阶(17)	坡上(14)	半阴坡(21)	柠条
		水平沟(7)	坡中(12)	半阳坡(7)	
		坡地(4)	坡下(2)		
		水平阶(1)	坡上(3)		
林地	5	水平沟(3)	坡中(1)	半阴坡(2)	杏树、梨树等
		坡地(1)	坡下(1)	半阳坡(3)	

注:表中括号内数字为不同整地方式和地形条件下的样点数。

用于拟合该函数模型有线性模型、球状模型、指数模型等,其中球状模型公式如下:

$$r(h)=\begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0+C\left(\frac{3h}{2a}-\frac{1h^3}{2a^3}\right) & 0<h\leq a \\ C_0+C & h>a \end{cases}$$
 (2)

式中: C_0 为块金值,反映随机因素所造成空间变异性特征; C 为结构方差,反映空间自相关因素引起的结构性变异; a 为变程,变程表示变量的最大相关距离; C_0+C 为基台值,是半变异函数达到的极限值,反映总的空间异质性; $C_0/(C_0+C)$ 为空间异质比,表示随

机因素导致的变异占总变异的比列,反映随机因素引起的空间变异程度大小^[18]。当 $C_0/(C_0+C)$ 为≤25, 25%~75%和≥75%时,分别表示研究变量有较强、中等和较弱的空间分布相关性^[19]。半方差函数分析利用 GS+9.0 软件进行,综合考虑决定系数 R^2 和残差 RSS 选择出最佳理论模型。利用 ArcGIS 10.2 软件对小流域有机碳含量进行普通克里格插值分析,形成小流域土壤有机碳含量的空间分布图。插值后在 ArcGIS 进行交叉验证分析并通过均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)对预测值与实际测定值进行对比分析,来评

价插值精度,其计算公式如下^[20]:

$$V_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{Z_i} - Z_i)^2}{n}}$$

(3)

$$V_{\text{MAE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\overline{Z_i} - Z_i|$$

(4)

$$V_{\text{MRE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\overline{Z_i} - Z_i|}{Z_i} \times 100\%$$

(5)

式中: $\overline{Z_i}$ 为样点的预测值; Z_i 为样点的实测值; n 为样点数。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤有机碳含量描述性统计特征

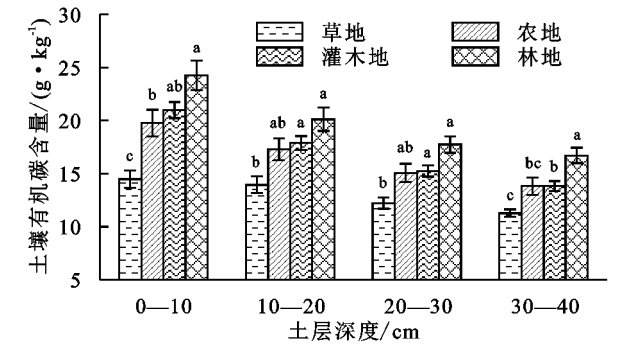
不同土地利用类型间和不同土层间的土壤有机碳含量存在显著性差异($p<0.05$,表 2)。林地 0—40

cm 土层有机碳含量显著高于其他 3 种土地利用方式,灌木地显著高于草地($p<0.05$),但和农地无显著差异($p>0.05$),农地与草地仅在 0—10 cm 存在显著差异(图 2)。不同土地利用方式下有机碳含量的垂直分布呈现出随土层加深而逐渐降低的趋势(表 2,图 2)。总体上,0—20 cm 土层有机碳含量显著高于 20—40 cm 土层($p<0.05$,表 2),其中林地 0—10 cm 土层有最大值为 27.56 g/kg,草地 30—40 cm 有最小值为 10.23 g/kg(图 2)。不同土地利用方式下土壤有机碳的变异程度不同,农地变异系数最大为 24.86%,灌木地及林地次之,而草地最小为 14.48%,4 种土地利用方式均为中等变异。从 0—40 cm 各土层来说,变异系数相差不大(19.03%~21.80%),且随土层深度的加深变异系数逐渐减少,各土层均具有中等强度的空间变异性。

表 2 不同土地利用方式下及不同土层土壤有机碳含量描述性统计特征

样地	样点数	最小值/ (g·kg ⁻¹)	最大值/ (g·kg ⁻¹)	平均值/ (g·kg ⁻¹)	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 检验
草地	20	10.23	17.13	12.98c	1.88	14.48	0.50	-0.40	0.944
农地	48	10.13	29.81	16.49b	4.10	24.86	1.10	1.57	0.203
灌木地	112	8.78	28.41	16.99b	4.21	24.78	0.70	0.13	0.108
林地	20	14.33	27.56	19.70a	3.66	18.58	0.77	0.02	0.911
0—10 cm	50	12.43	29.81	20.37A	4.44	21.80	0.26	0.85	0.778
10—20 cm	50	11.06	27.91	17.57B	3.50	19.92	0.82	0.50	0.379
20—30 cm	50	10.70	21.63	15.15C	2.90	19.14	0.51	0.51	0.571
30—40 cm	50	8.78	20.28	13.87C	2.64	19.03	0.30	0.28	0.535

注:表中不同小写字母表示不同土地利用方式间有显著性差异,不同大写字母表示不同土层间有显著性差异($p<0.05$)。



注:图中不同小写字母表示不同土地利用方式间有机碳含量有显著性差异($p<0.05$)。

图 2 0—40 cm 土层不同土地利用方式对有机碳含量的影响

2.2 土壤有机碳的空间变异特征

在描述性统计基础上进一步利用地统计学方法定量分析小流域土壤有机碳含量的空间变异结构。每层有机碳数据 K-S 检验结果表明数据服从正态分布,可以进行地统计学分析与空间差值分析。土壤有机碳含量半方差变异函数拟合后选取的最优半方差模型见表 3。本研究中不同土层土壤有机碳最佳

半方差模型均为球状模型,其中以 0—10 cm 土层土壤有机碳的拟合程度最好($R^2=0.529$)。不同土层土壤有机碳含量的空间异质比即 $C_0/(C_0+C)$ 介于 1.18%~6.51%,均小于 25%,且随土层深度的增加而减少。这说明小流域土壤有机碳含量具有强烈的空间自相关性,且随土层深度的增加,其空间分布自相关性增强,变异主要由结构性因素引起。0—40 cm 土壤有机碳强烈的空间相关性主要存在于变程为 139—175 m 的范围内,且不同土层间有不同的变程范围,其中 0—10,10—20 cm 土层要高于 20—30,30—40 cm。

由图 3 可知,块金值 C_0 及基台值 C_0+C 都有逐层降低的趋势,表明随土层的加深随机性因素所产生的空间变异在总变异中所占比例逐渐降低。也就是说由于耕作、施肥等人为活动引起的土壤有机碳含量的空间相关性有降低的趋势。在一定的步长范围内,增加相同步长,半方差变化范围随土层加深有减少的趋势,即土层有机碳变异程度随土层加深而减弱。

表 3 不同土层土壤有机碳含量的半方差函数理论模型及参数

土层深度/cm	模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程/m	决定系数 R^2	残差 RSS
0—10	Spherical	1.34	20.57	6.51%	170	0.53	26.40
10—20	Spherical	0.74	12.65	5.85%	175	0.42	16.70
20—30	Spherical	0.13	8.27	1.57%	145	0.44	3.25
30—40	Spherical	0.08	6.79	1.18%	139	0.44	1.71

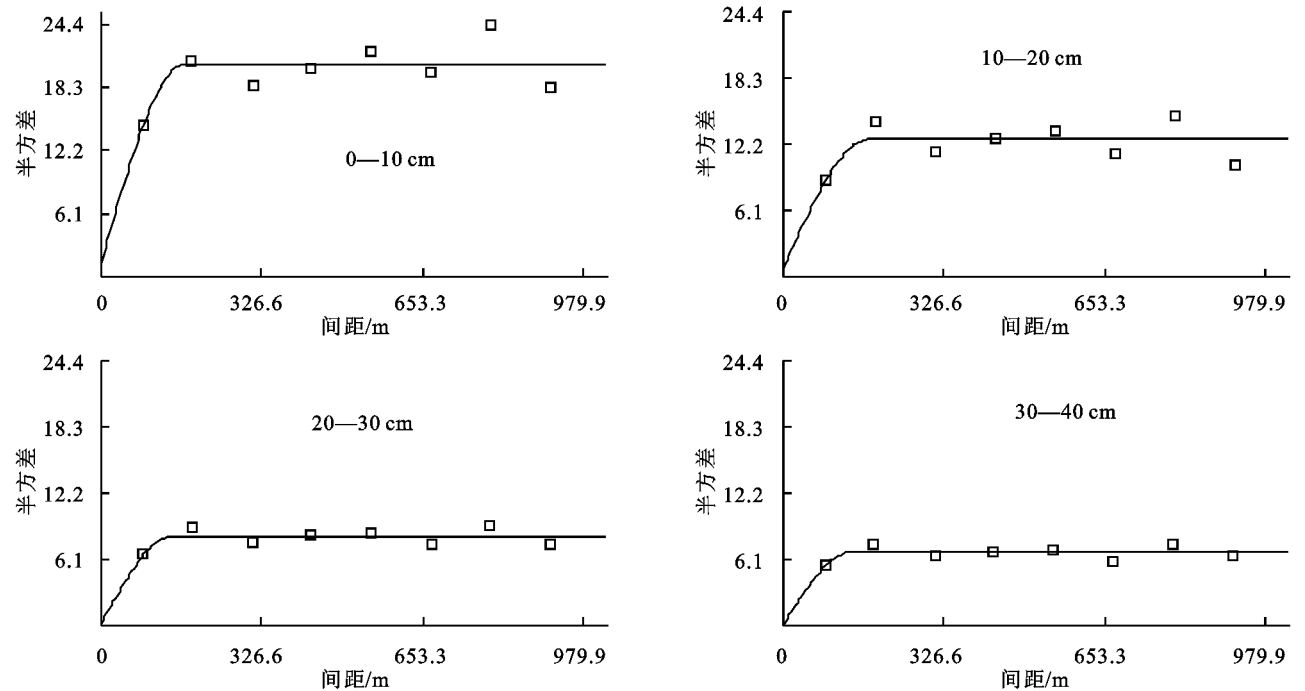


图 3 土壤有机碳各向同性半方差函数

2.3 土壤有机碳的空间分布特征

小流域 0—40 cm 土层土壤有机碳含量呈斑块状分布,且各层分布规律基本相似(图 4)。东北部及中南部有机碳含量普遍较高为 14.96~22.48 g/kg,南部及中北部含量较低为 12.58~17.60 g/kg。从垂直分布上看,呈现出随土层加深含量逐渐减少的趋势。0—10 cm 土层有机碳含量最高为 17.80~22.48 g/kg; 10—20 cm 及 20—30 cm 土层有机碳含量分别为 15.93~20.33,13.66~16.39 g/kg;而 30—40 cm 含量最低为 12.58~14.96 g/kg。

克里格交叉验证参数见表 4。不同土层土壤有机碳含量插值结果大多比实测值偏大,且随土层的加深偏离程度有减小的趋势。表 4 结果说明,各层有机碳插值结果基本可靠但从插值精度来说 30—40 cm 土层的土壤有机碳含量插值结果最好,20—30,10—20 cm 土层次之,0—10 cm 土层稍差,这可能与表层土壤容易受到人类活动等随机因素的影响。而各层均方根误差 RMSE 值相对偏大可能是因为本研究采样点的设置并不是完全根据网格进行等间距的采样从而造成的采样点间距偏大。

2.4 小流域土壤有机碳的影响因素

小流域坡位、坡向及整地方式对土壤有机碳含量

的影响见表 5。方差分析表明,3 种坡位之间土壤有机碳含量存在显著差异($p<0.05$,表 5)。其中,坡上有机碳含量为 17.36 g/kg,显著高于坡中(15.99 g/kg)。不同坡位的变异系数介于 22.58%~27.37%,为中等变异程度,坡上变异程度略高。不同坡向对土壤有机碳含量没有显著性影响($p>0.05$,表 5),半阳坡和半阴坡的变异系数分别为 27.94%,27.89%,均为中等变异。不同整地方式对小流域土壤有机碳含量产生了影响,其中水平沟和梯田有机碳含量显著高于水平阶和坡地,但不同整地方式下的变异系数相差不大(24.04%~25.83%),均为中等变异。

表 4 克里格交叉验证参数

土层深度/cm	均方根误差 RMSE	平均绝对误差 MAE	平均相对误差 MRE/%
0—10	4.97	4.16	21.68
10—20	4.07	3.20	18.45
20—30	3.28	2.70	18.22
30—40	2.93	2.29	17.30

同一坡向和坡位下不同土地利用方式有机碳含量存在显著性差异($p<0.05$,图 5),且均表现为林地显著高于草地($p<0.05$)。在同一土地利用方式下,除农地在不同坡位存在差异外,其他土地利用方式在坡向和坡位

的有机碳含量均没有显著性差异($p>0.05$,图 5)。农地在坡下的有机碳含量显著高于坡上($p<0.05$)。同一整地方式下,坡底和水平阶的不同土地利用方式有机碳含量存在显著性差异($p<0.05$,图 5),林地整体较高。在同一土地利用方式下,林地有机碳含量没有显著性差异

($p>0.05$),但灌木地存在显著高于草地($p<0.05$)。柠条是小流域灌木地的主要植被类型,也是小流域土壤有机碳含量较高的斑块(图 1、图 4),从结果来看,坡地土壤有机碳含量显著高于水平阶($p<0.05$),水平沟处于两者中间并且与它们没有显著差异。

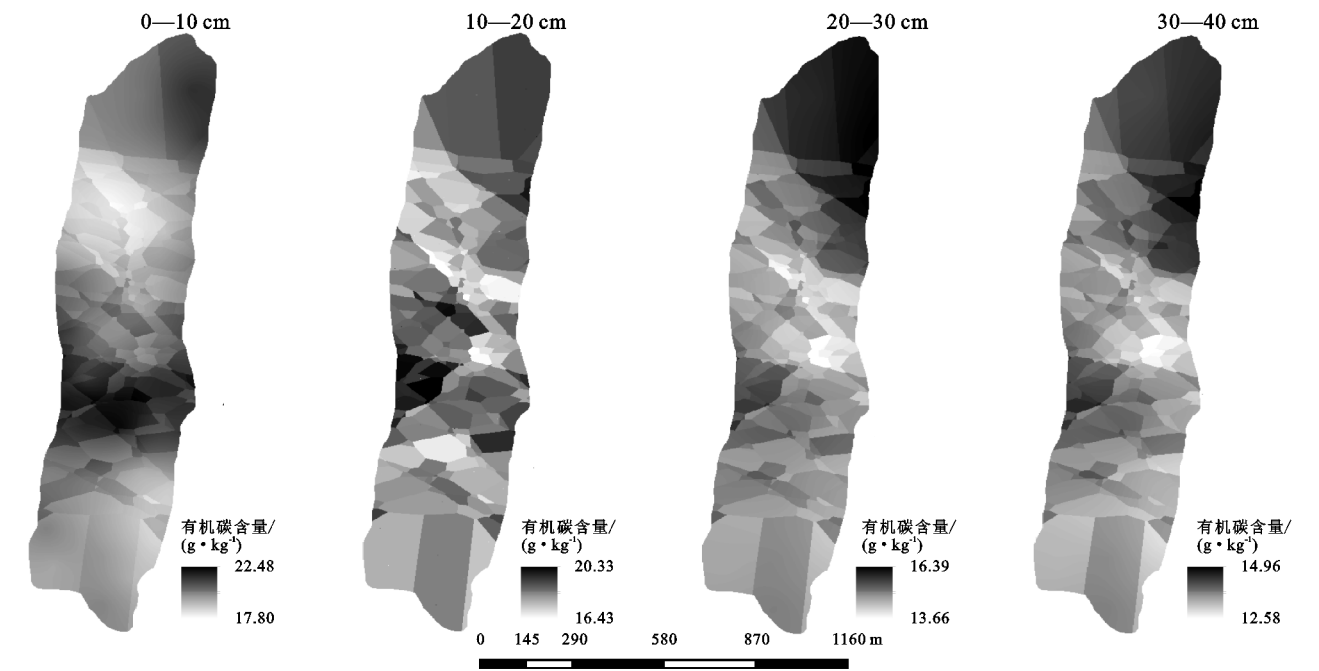


图 4 土壤有机碳含量分布

表 5 不同地形条件和整地方式对小流域土壤有机碳含量的影响

地形	样点数	最小值/ (g·kg ⁻¹)	最大值/ (g·kg ⁻¹)	平均值/ (g·kg ⁻¹)	标准差	变异 系数/%
坡上	76	8.78	28.41	17.63a	4.82	27.37
坡中	60	8.78	26.36	15.99b	3.65	22.85
坡下	64	10.58	29.81	16.39ab	3.81	23.24
半阴坡	112	8.78	27.18	16.62	3.81	22.94
半阳坡	88	10.13	29.81	16.90	4.71	27.89
水平阶	72	8.78	25.61	16.47B	3.96	24.04
梯田	48	10.13	29.81	16.49AB	4.10	24.86
坡地	40	10.23	27.18	16.03B	4.14	25.83
水平沟	40	11.03	28.41	18.23A	4.69	25.73

注:图中不同小写字母表示不同坡位间有机碳含量有显著性差异,不同大写字母表示不同地形间有机碳含量有显著差异($p<0.05$);未标字母的表示差异不显著($p>0.05$)。

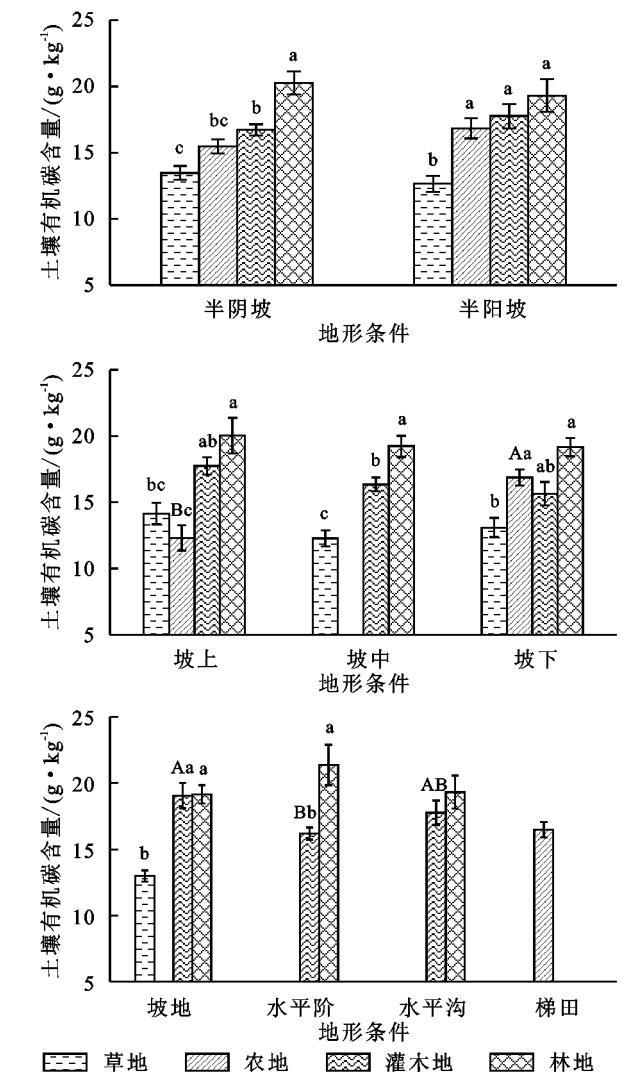
3 讨论

本研究中,小流域中不同土地利用方式土壤有机碳含量具有显著差异,林地最高,灌木地和农地次之,草地最低(图 2)。这种差异可能是由于不同的土地利用方式改变了地表植物覆盖和枯枝落叶量以及根系生物量,从而改变有机碳的主要来源^[21]。相较于农地和草地,灌木地和林地的植物根系更发达,枯枝落叶等凋落物更丰富,更加有利于有机碳的积累。变异系数表明,农地的变异程度最大,灌木地及林地次

之,草地最小。这主要是因为农地受人类活动影响强度较大,耕作、施肥及灌溉等土壤管理措施的不同导致土壤有机质输入存在差异,导致变异程度最高^[1,8];而灌木地及林地虽然地表凋落物较为丰富,但土壤团聚体相对稳定,因此表现出相对稳定的变异程度;草地有机碳来源输入较稳定,故表现出较低的变异程度。本研究中,小流域的土壤有机碳含量在垂直分布上均表现出随土层的加深而显著降低的趋势,这一研究结果与多数研究结果一致^[22-23]。这主要是由于以地表凋落物积累为主要来源的有机碳,随着土层深度的增加,其输入逐渐降低的原因^[24]。

本研究中地统计学分析表明,随土层深度的加深,各土层块金值与基台值的比值即 $C_0/(C_0+C)$ 有减小的趋势且均小于 25%,表现出强烈的空间相关性,其中结构性因素起主要作用(表 3,图 3)。贾宇平等^[3]同样对各层土壤有机碳含量进行分析,结果 $C_0/(C_0+C)$ 值均小于 12%。这表明虽然不同的土地利用方式,管理措施等人为活动作用于表层土壤,破坏了表层原有的空间相关性,但土壤仍保持着气候、地形等自然因素的长期作用形成的空间相关性^[22],且这种变异性随土层的加深,结构因素的作用越来越强。这与吕成文等^[21]的研究结果相一致,他们认为 0—100 cm 土壤有机碳比表层 0—20 cm 更容易受结

构性因素的影响。小流域土壤有机碳含量在其东北部及中南部有机碳含量较高,南部及中北部含量较低(图4)。结合样点土地利用方式分布来看,小流域东北部及中南部地区主要以人工种植的柠条为主,其较高的生物量和土壤动物及微生物活动量会促进有机碳含量的增加^[15],且柠条多以水平沟和水平阶的整体方式进行种植,这在一定程度上减缓坡面径流流速有效积累有机碳含量。中北部地区为耕地,位于坡下位置易受土壤沉积作用的影响但由于长期耕作会破坏土壤团聚体稳定性,加速有机碳的矿化作用从而一定程度上造成土壤有机碳含量的相对减少^[25]。而南部地区土壤有机碳含量也相对较低,一方面是因为该区域以坡面为主的撂荒地实际占比面积较大,其根系及生物量较少也受到侵蚀作用影响易造成有机碳的流失,另一方面也可能与采样林地多为人工种植树龄较低的果树有关。



注:图中不同小写字母同一地形条件不同土地利用方式间有机碳含量有显著性差异,不同大写字母表示同一土地利用方式不同地形条件下有机碳含量有显著差异($p < 0.05$);未标字母的表示差异不显著($p > 0.05$)。

图5 不同地形条件和不同土地利用条件下土壤有机碳含量

本研究中,地形条件的差异对小流域土壤有机碳的空间分布产生了明显的影响。从整个小流域尺度来说,坡位和微地形整地方式均对土壤有机碳有显著影响($p < 0.05$),但坡向则没有显著影响($p > 0.05$,表5)。从坡位来说,本研究中有有机碳含量表现为坡上>坡下>坡中,这与一些研究表现出坡下>坡中>坡上的结果不尽相同^[6]。影响坡面土壤有机碳分布的原因比较复杂,一般来说,受侵蚀—沉积作用的影响,坡上和坡中位置土壤有机碳常伴随水土流失会向坡下发生转移并在坡下逐渐沉积富集,致使坡下有机碳含量较高^[26]。但坡面微地形整地方式与不同植被类型种植相结合可改变原有坡面的这种土壤有机碳空间分布特征。沈艳等^[27]研究了不同管理方式下宁夏典型草原土壤的理化特征,认为经过较长时间的水平沟整地方式其土壤养分总体较高主要是由于水平沟能够有效拦截坡地径流中携带的养分。而水平阶整地方式能够有效减缓坡面径流流速进而影响土壤有机碳的累积情况^[28]。梯田则通过改变地形地貌,使田面变得平整均匀,从而减少地表径流起到蓄水保肥积累土壤有机碳的作用^[29]。小流域4种整地方式下土壤有机碳的差异也体现出这种影响,柠条为主的水平沟显著高于柠条为主的水平阶和农田为主的梯田,以荒草地为主的坡地最低(表5)。整地方式与植被类型的差异也使得半阳坡和半阴坡的土壤有机碳差异不显著。对于梯田来说,位于坡下的梯田有机碳含量会显著高于坡上,这主要因为坡下位置更容易出现有机碳的沉积现象从而提高其含量。从柠条灌木地这一小流域主要土地利用方式来说,坡位和坡向对土壤有机碳没有显著影响($p > 0.05$),但微地形整地方式则有显著影响($p < 0.05$,表6),破坏较小的缓坡地要高于整地较大的水平沟和水平阶,这也进一步说明整地方式在小流域土壤有机碳积累中的重要作用。总体来说,人工种植柠条的灌木地对小流域土壤有机碳的积累产生了积极作用,但其作用效果也受微地形整地方式的较大影响。

4 结论

黄土丘陵区火岔湾小流域0—40 cm土壤有机碳含量为8.78~29.81 g/kg,且表现为林地>灌木地>农地>草地,变异系数为19.03%~21.80%,属中等程度变异。不同土地利用方式下有机碳含量均随土层加深而逐渐降低。各土层土壤有机碳的半方差拟合模型均为球状模型,存在着强烈的空间自相关性,

土壤的结构性因素引起的空间变异在总变异中所占比例较大起主要作用,由随机因素引起的空间变异较小。克里格插值结果表明,以人工种植柠条为主的区域整体土壤有机碳含量较高,而耕地及撂荒草地为主的区域整体含量较低。破坏较小的缓坡地要有机碳含量高于整地较大的水平沟和水平阶。在研究区,人工种植柠条为主的生态恢复方式改变了小流域土壤有机碳空间变异性,并且其作用效果也与微地形整地方式有较大关系。本研究表明,在人工植被恢复主导的小流域土壤有机碳研究中,将植被恢复类型与整地方式耦合分析非常重要。

参考文献:

- [1] Shi P, Zhang Y, Li Z, et al. Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652:505-512.
- [2] Jin Z, Cui B, Song Y, et al. How many check dams do we need to build on the Loess Plateau[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(16):8527-8528.
- [3] 贾宇平, 苏志珠, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1):31-34.
- [4] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(18):5358-5371.
- [5] 孙文义, 郭胜利. 天然次生林与人工林对黄土丘陵沟壑区深层土壤有机碳氮的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(10):2611-2620.
- [6] 刘守赞, 郭胜利, 王小利, 等. 植被对黄土高原沟壑区坡地土壤有机碳的影响[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(4):529-536.
- [7] 张梦薇, 吕成文. 丰乐河流域表层土壤有机碳空间变异特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(7):1576-1583.
- [8] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1):1-11.
- [9] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域不同地形下土壤性质分布特征[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(6):946-953.
- [10] 孙文义, 郭胜利. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2011, 31(6):1604-1616.
- [11] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. *Catena*, 2014, 121:151-163.
- [12] Sun W Y, Zhu H H, Guo S L. Soil organic carbon as a function of land use and topography on the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 83:249-257.
- [13] 张飞, 陈云明, 王耀凤, 等. 黄土丘陵半干旱区柠条林对土壤物理性质及有机质的影响[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(3):105-109.
- [14] 杨新国, 赵伟, 陈林, 等. 荒漠草原人工柠条林土壤与植被的演变特征[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(4):590-594.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [16] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5):533-544.
- [17] Isaaks E H, Srivastava R M. An Introduction to Applied Geostatistics[M]. New York, USA: Oxford University Press, 1989.
- [18] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学[M]. 武汉: 地质出版社, 1988.
- [19] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5):1501-1511.
- [20] 顾春雷, 杨漾, 朱志春. 几种建立 DEM 模型插值方法精度的交叉验证[J]. *测绘与空间地理信息*, 2011, 34(5):99-102.
- [21] 吕成文, 崔淑卿, 赵来. 基于 HNSOTER 的海南岛土壤有机碳储量及空间分布特征分析[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(6):1014-1018.
- [22] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 赤峰市黄花甸子流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(3):742-748.
- [23] Albaladejo J, Ortiz R, Garcia-Franco N, et al. Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(2):265-277.
- [24] Köchy M, Wilson S D. Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and forest and mixed-grass prairie[J]. *Ecology*, 1997, 78(3):732-739.
- [25] 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.
- [26] 李嵘. 黄土高原坡耕地土壤侵蚀对土壤有机碳的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [27] 沈艳, 马红彬, 谢应忠, 等. 宁夏典型草原土壤理化性状对不同管理方式的响应[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5):84-89.
- [28] 杨文利, 朱平宗, 闫靖坤. 水平阶种植油茶对红壤坡地土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5):315-320.
- [29] 邱宇洁, 许明祥, 师晨迪, 等. 陇东黄土丘陵区坡改梯田土壤有机碳累积动态[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1):87-98.