

DOI: 10.5846/stxb201311262813

薛志婧, 马露莎, 安韶山, 王万忠. 黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量. 生态学报, 2015, 35(9): 2917–2925.

Xue Z J, Ma L S, An S S, Wang W Z. Soil organic carbon density and stock at the catchment scale of a hilly region of the loess plateau. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2917–2925.

黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量

薛志婧¹, 马露莎², 安韶山^{1,2}, 王万忠^{1,*}

1 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学 资源环境学院, 杨凌 712100

摘要: 通过对上黄小流域不同土地利用方式下 114 个样点的采样分析, 结合地统计学原理对小流域不同土层土壤有机碳密度的空间变异程度进行研究。研究表明, 除表层土壤有机碳密度的空间变异程度较弱外, 其余两层均属于中等强度变异。并呈现东部天然草地分布区与中部带状灌丛林地分布区空间变异程度较强的分布特点。不同土层深度和土地利用方式下土壤有机碳密度存在明显差异, 土壤有机碳含量随着土层深度的增加而逐渐减小, 有机碳密度则表现为 10—30cm 最高, 30—60cm 其次, 0—10cm 最低。不同土地利用方式下, 有机碳密度表现为: 天然草地>果园>灌丛林地>河滩、河台地>撂荒地>人工草地>耕地。以土地利用方式为基本单元, 对上黄小流域土壤有机碳储量进行估算。结果表明, 上黄小流域土壤有机碳总储量为 46527.12t, 其中, 灌丛林地(22052.81t)和天然草地(14573.14t)的储量最高, 占总储量的 78.72%。

关键词: 土壤有机碳密度; 土壤碳储量; 土地利用方式; 半方差函数模型

Soil organic carbon density and stock at the catchment scale of a hilly region of the loess plateau

XUE Zhijing¹, MA Lusha², AN Shaoshan^{1,2}, WANG Wanzhong^{1,*}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Colleges of Resources and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: An analysis of 114 sampling points was conducted in the Shanghuang catchment under different land uses in hilly regions of the Loess plateau. Combined with the geo-statistics method, this study focused on the spatial variation of soil organic carbon (SOC) density with land use and soil depth. The results indicated that the spatial variability of SOC density was low intensity at a depth of 0–10 cm, and middle intensity at 10–30 cm and 30–60 cm. Higher spatial variations were distributed in the natural grassland area to the east and the shrub land in the middle of this small watershed. Soil organic carbon density was significantly different among land uses and soil profile depths; it decreased as soil depth increased. At different depths, the highest SOC density value was in the 10–30 cm layer, and lowest in the 0–10 cm layer. For different land uses, the SOC density showed the following trend: natural grassland > orchard > shrub land > terrace cropland > abandoned farmland > manmade grassland. According to the estimated SOC stock, the total stock of the Shanghuang catchment was 46527.12 t and the carbon storage of shrub land (22052.81 t) and natural grassland (14573.14 t) accounted for 78.72% of the total.

Key Words: soil organic carbon density (SOCD); soil organic carbon stock; land uses; variograms model fitting curve

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171226, 41101254); 西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”资助

收稿日期: 2013-11-26; 修订日期: 2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dbwangwz@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

黄土高原地质景观破碎,低山丘陵连绵不断,由于长期严重的水土流失,导致沟壑纵横。在区域尺度上,形成了典型的黄土高原沟壑(塬面、梁峁坡、沟谷)和黄土丘陵沟壑(梁峁顶、梁峁坡、沟谷地)等流域侵蚀地貌特征。土壤的空间异质性是多种物理、化学和生物过程共同作用的结果。研究土壤的空间异质性、分布特征及与环境因子(如气候、土地利用类型和景观特征等)之间的相互关系,对黄土高原生态修复具有重要意义。黄土高原是重要的土壤碳库,由于其特殊的地形地貌特征,导致土壤碳的空间异质性具有不同程度的差异。土壤的空间变异特征主要是受地形、气候、土壤母质、土地利用类型和植被类型等因素的影响。由于地形支配着水热资源的分配,影响植被和土地利用方式在空间上的配置,导致许多自然现象和生态过程的发生,如土壤养分和水分的变化,地表径流与土壤侵蚀,生物多样性的分布和生物地球化学循环等^[1-2]。因此,不同地形因水热等差异导致不同土地利用方式下的土壤具有显著的分异性^[3-4]。在中小尺度范围内,气候差异不显著时,景观因子和土地利用方式成为影响土壤空间变异的关键因素^[5-8]。不合理的土地利用方式和地表植被的破坏是导致黄土高原地区土壤性质恶化的主要原因。退耕还林还草和植被恢复措施改变了原有的土地利用方式,使区域生态环境得到改善的同时,影响了土壤的空间分布格局。目前已有研究表明,以退耕还林还草为主的土地利用方式的改变使表层土壤有机碳,具有明显的碳汇效应。黄土高原实施退耕还林后,土壤有机碳含量明显增加,实施退耕 20a,土壤有机碳总量增长 18.48%^[8-10]。本文以宁南山区固原生态站 30a 长期综合治理小流域上黄为研究对象,应用地统计学和 GIS 相结合的方法,在半方差函数理论的基础上,对土壤有机碳密度的空间变异特征及退耕还林还草后,土地利用方式对土壤有机碳密度和储量的影响程度进行研究。

1 试区概况

上黄小流域位于宁夏南部山区固原市河川乡上黄村境内(106°26′—106°30′ E, 35°59′—36°02′ N),地处黄土高原宽谷丘陵沟壑区。小流域南北长约 3844 m,东西宽约 3758 m,梁峁起伏,沟壑纵横。其中,沟坡地占到试验区土地总面积的 90%,平台地仅占 8%。上黄试验区地属温带半干旱气候带,年均气温 6.9℃,年均降水量 419.1 mm,干燥度 1.55—2.0。雨季从 7 月开始持续到 10 月,8 月降水量最多,占总降水的 24%。区内土壤多为黄土母质上发育成的黄绵土和黑垆土,土壤贫瘠,肥力较低,水土流失严重。

小流域内的土地利用方式主要由耕地、果园、人工草地、天然草地、灌丛林地、撂荒地和河滩、河台地组成,植被类型主要以人工灌木林、天然草地和人工草地为主。人工灌木林主要以柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主,人工草地以紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为主。天然草地主要有:铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、白蒿(*Artemisia stelleriana*)、大针茅(*Stipa grandis*)、百里香(*Thyme*)和萎陵菜(*Potentilla chinensis*)。其中,天然草地分布最广。自 1982 年生态恢复试验站建立以来,根据小流域地形地貌的特殊性,针对西部大开发提出的首要问题——搞好生态环境建设,结合退耕还林还草措施,对土地资源进行有效配置,改变其传统的土地利用方式,实现集水土流失控制与经济发展与一体的土地整理和利用结构的优化调控。

2 材料与方法

2.1 样品采集与测定

野外采样于 2011 年和 2012 年,2012 年的采样是对 2011 年小流域布点(83 个)的补充和完善。根据小流域内不同的土地利用方式和地形坡位,结合植被类型选取典型剖面,采用非等间距不规则网格布点法钻孔取样 114 个。每个样点分 0—10、10—30 和 30—60 cm 3 层,2 次重复。采集样点的基本信息,包括地理坐标(GPS 仪)、土地利用方式、植被类型、优势种群等,最终生成小流域的样点分布图(图 1)。土样风干、混合均匀后,磨细过 0.25mm 筛,土壤有机碳采用重铬酸钾容量-外加热法;含水量采用烘干法,即新鲜土样 105℃ 烘干 8 h;土壤容重采用环刀法,采集 0—10、10—30 和 30—60 cm 土层原状土,各层重复 2 次,烘干称重测取各层土壤容重。

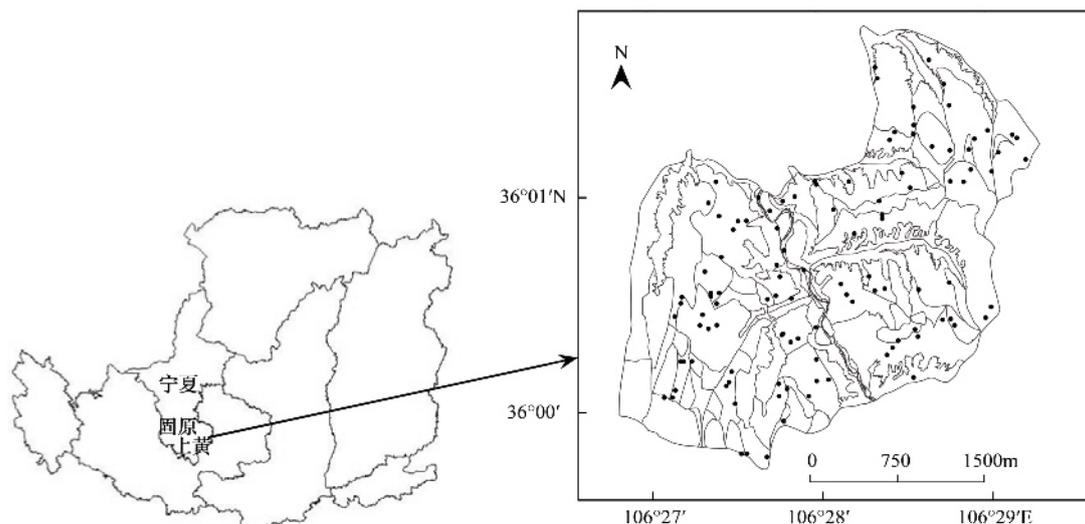


图 1 小流域位置及样点分布图

Fig. 1 The location of Shanghuang small watershed and the distribution of sample sites

表 1 小流域土地利用类型与土壤样点分布

Table 1 The distribution of land uses, sample sites and theirs' proportion

土地利用类型 Land uses	面积/hm ² Area	面积比例/% Proportion	样本个数/n Num.	样本比例/% Proportion
灌丛林地 Shrub land	3.996	48.79	30	20.84
天然草地 Natural grassland	1.773	21.64	12	8.33
人工草地 Manmade grassland	0.145	1.76	8	5.56
撂荒地 Abandoned land	0.410	5.00	38	26.39
果园 Orchard	0.461	5.63	7	4.86
耕地 Farmland	1.289	15.74	12	8.33
河滩、河台地 Terrace land	0.085	1.04	7	4.86

2.2 理论基础

地统计学是以区域化变量理论为基础,以半方差函数为重要工具,建立在区域化变量、随机函数、内涵假设、平等性假设等概念基础上的一种数学方法,研究在空间分布上既有随机性又有结构性,或空间相关性和依赖性的自然现象的科学^[11-15]。通过对数据的最优无偏内插估计,模拟其离散型和波动性^[15]。半方差函数是地统计学特有的分析工具,是研究土壤空间变异的关键函数,反映了不同距离观测值之间的变化。大量研究表明,地统计学方法中半方差函数图和 Kriging 插值法适用于土壤养分的空间预测^[16],并得到了广泛应用。

2.2.1 统计分析与 Kriging 插值分析

Kriging 是地统计中最为常用的插值方法,它应用于地统计学预测和模拟时,对数据集的正态分布预测精度要求较高。故在进行插值之前,应先判断数据集的正态分布状况。本文利用 ArcGIS 中的正态 QQ 图对数据集进行判读,结果表明正态 QQ 分布图上样点的散布态势与直线有相当程度的接近,符合正态分布趋势,故可以利用 Kriging 法研究其空间分布特征。

2.2.2 半方差函数

半方差函数是地统计学特有的分析工具,其理论模型可用来分析土壤空间变异的随机性和结构性,它是地统计学特有的工具和分析的基础。根据步长 h 和半方差函数 $\gamma(h)$ 之间的关系,选择最优理论模型。

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

<http://www.ecologica.cn>

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数; h 为样点空间间隔距离, 称为步长; $Z(X_i+h)$ 为间隔为 h 的 2 个观测点的实测值; $N(h)$ 是以 h 为步长的所有观测点的成对数目。由 $\gamma(h)$ 对 h 作图可得到半方差函数图, 根据决定系数和残差 RSS 对半方差函数进行拟合得到最优的理论模型。

半方差函数最优理论模型的选取原则: 分别用不同参数对模型进行拟合, 首先考虑决定系数 R^2 和残差 RSS, R^2 越大, RSS 越小, 拟合模型越合理。其次考虑独立间距适中、块金值较小的模型, 最后用交叉检验法来修正最优模型的参数。其中, 变异函数的计算过程中也要求数据符合正态分布, 否则可能存在比例效应^[16-17]。

2.2.3 半方差函数图

步长 h 和与之相应的半方差曲线 $\gamma(h)$ 构成半方差函数图, 从半方差函数图中可以判读空间变量的相关长度(变程)及变异程度。判读过程中有 3 个重要参数, 分别为块金值 C_0 、基台值 C_1 和变程 a 。

C_0 表示空间变量间最小变异程度, 表征小间隔空间变量的随机分布特征。主要由随机因素引起, 说明在采样间隔内有可能存在更小尺度的空间变异。基台值 C_1 表示空间变量间最大变异程度, 主要由空间自相关因素引起。变程 a 表示变量空间自相关性特征长度, 指变异函数达到基台值所对应的距离, 其值大小表明属性因子空间相关的大小, 揭示区域化变量影响范围的大小, 或自相关范围的大小^[17], 即两个观测点间的距离小于变程时, 观测值之间存在相关关系, 大于观测距离时观测值是相互独立的。从变异因素角度看, $1-C_0/(C_0+C_1)$ 即块金系数, 其代表系统变量的空间异质性程度或空间相关性程度, 是衡量区域化随机变量空间变异程度的重要指标。当比值 $<25\%$, 表明系统具有强烈的空间相关性; 比值在 $25\%—75\%$ 之间, 系统具有中等强度的空间相关性; 比值 $>75\%$ 则系统呈现出弱空间相关性^[8]。

2.3 数据分析

2.3.1 土壤碳密度及储量的计算

土壤有机碳密度是评价和衡量土壤中有有机碳储量的一个极其重要的指标, 是指单位面积土体中所含土壤有机碳质量, 是表征土壤质量及陆地生态系统对全球变化贡献大小的量度指标。国际上通常指土壤剖面深度为 1m, 每平方米土体中所含有的土壤有机碳质量 (kg/m^2)^[18]。

$$D_{\text{soc}} = \sum_{i=1}^n (1 - C_i) \times B_i \times 0.58 \times \text{SOM}_i \times \frac{H_i}{10}$$

式中 D_{soc} 是土壤有机碳密度 (kg/m^2); C_i 是第 i 层(粒径 $>2\text{mm}$) 砾石含量(体积 %); B_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm^3); SOM_i 为第 i 层土壤有机质含量(%); H_i 为第 i 层土层厚度 (cm); n 为参与计算土壤层次总数; 0.58 为 Bemmenlen 换算系数。

土壤碳储量估算公式:

$$S_{\text{soc}} = \sum_{i=1}^n S_i \times D_{\text{soc}i}$$

式中, S_i 为各土地利用类型分布的面积; $D_{\text{soc}i}$ 是土壤碳密度。

2.3.2 数据分析

本文采用地统计学方法, 结合半方差函数的块金值、基台值和变程等表示区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度的参数, 对土壤有机碳密度进行研究。将 114 个土壤剖面数据, 通过单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫检验(one-sample kolomogorov-semirnov, K-S) 检验后, 应用地统计学软件 GS+, 对原始数据(土壤有机碳密度变异性较差的) 进行对数转换处理, 使其满足正态分布或近似正态分布规律。采用 ArcGIS 地统计分析模块的 Kriging 线性无偏估计最优插值法, 对未测点进行估算, 绘制出小流域土壤有机碳密度的空间分布图。

3 结果及分析

3.1 土壤有机碳含量及密度的描述性统计

上黄小流域土壤有机碳含量及密度的描述性统计结果(表 4) 显示, 各层土壤有机碳含量和密度的平均值

保持在 5.19—10.97 g/kg 和 7.22—11.38 kg/m² 范围内, 表层土壤有机碳含量最高为 10.97 g/kg, 30—60 cm 土壤有机碳密度最高。土壤有机碳含量随土壤深度的增加而减小。

变异系数 CV 揭示随机变量的离散程度, 即土壤空间变异性的 大小。通常认为变异系数 $CV \leq 10\%$ 时为弱变异, $10\% \leq CV \leq 100\%$ 为中等强度变异, $CV \geq 100\%$ 时为强变异^[19]。从表 2 可以看出三层土壤有机碳含量和密度的变异系数分别为 52.71、48.40、49.92% 和 52.61、46.69、49.59%。这表明三层土壤有机碳含量和密度均属于中等变异强度。按照反映离散程度变异系数大小分级, 土壤有机碳密度的空间变异特征差异不明显, 10—30cm 土层的变异强度较之最低。

表 2 土壤有机碳含量及密度的描述性统计性分析

Table 2 Descriptive statistical analysis of soil organic carbon and soil organic carbon density

土壤碳 Soil carbon	土层深度 Soil depth/ cm	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 S. D.	变异系数 CV	偏差 Skewness	峰度 Kurtosis
土壤有机碳含量	0—10	1.28	24.55	9.978	5.294	53.06	0.865	0.146
Soil organic carbon	10—30	1.11	20.02	7.308	3.537	48.40	0.721	0.601
SOC/(g/kg)	30—60	0.98	10.66	4.512	2.106	46.68	0.683	-0.116
土壤有机碳密度	0—10	1.39	17.97	7.22	3.80	52.61	1.014	0.571
Soil organic carbon density	10—30	1.48	26.76	11.38	5.31	46.69	0.703	0.377
SOCD/(kg/m ²)	30—60	2.05	33.41	10.92	5.41	49.59	1.094	1.999

Min.: Minimum value; Max.: Maximum value; Mean: Mean value; S. D.: Standard deviation; CV: Coefficient of variation

3.2 土壤有机碳及密度的地统计学分析

土壤异质性是结构因素和随机因素共同作用的结果, 结构因素包括气候、母质、地形、土壤类型等, 是导致土壤具有较强空间相关性的重要因素, 而随机因素如施肥、耕作措施和种植制度等人为活动则可能使土壤在大尺度范围内的空间相关性减弱, 并朝单一方向发展^[20-22]。表 3 为土壤有机碳密度的半方差函数模型及相关参数。其中 0—10cm 土层块金值 C_0 最小(0.0487), 说明表层土壤有机碳密度是由随机因素引起的, 其变程 a (5.4 m) 小于滞后距离(9.6 m), 说明在表层土壤有机碳密度在采样间距范围内存在更小尺度的变异。而 10—30(0.2213) 和 30—60 cm(0.1882) 土层的块金值 C_0 较大, 且在基台值 C_0+C_1 中占一定比例, 分别为 43% 和 45%, 说明 10—30 与 30—60cm 土层是由结构因素和随机因素共同作用的结果, 其中结构因素占主导地位。变程 a 是指变异函数达到基台值所对应的距离, 反映土壤空间异质性自相关范围的大小, 是土壤异质性在空间上的平均变异尺度, 提供了研究土壤异质性相似范围的一种预测^[16]。10—30 和 30—60 cm 土层有机碳密度的变程 a 较大, 分别为 67.55 和 54.39 m, 说明两个土层的土壤有机碳密度在小流域范围内均有相关关系, 区域因素对其影响较大。而表层土壤变程 a 较小, 除了受母质、地形和土壤类型等自然条件的影响外, 人为干扰因素对其影响较大。因此, 导致表层土壤有机碳密度在相对较小的范围内存在相关关系。

表 3 土壤有机碳密度的半方差函数模型及参数

Table 3 Semi-variogram model and parameters of soil organic carbon density

土层深度 Soil depth/cm	最优模型 Optimum model	块金值 C_0	基台值 C_0+C_1	变程 a /m	块金系数 Proportion	决定系数 R^2	残差 RSS	
土壤有机碳密度	0—10	指数	0.0487	0.3014	5.4	0.838	0.046	0.0184
Soil organic carbon density	10—30	高斯	0.2213	0.5106	67.55	0.561	0.606	0.0707
(SOCD)	30—60	高斯	0.1882	0.4171	54.39	0.549	0.480	0.0826

C_0 : Nugget; C_0+C_1 : Sill; a : Rang; R^2 : Determination coefficient; RSS: Residual error

3 层土壤有机碳密度的半方差函数拟合曲线均表现出一定的孔穴效应(图 2), 所谓的孔穴效应是指半方差函数曲线在超过一定范围(滞后距离)后表现出的围绕基台值周期性上下波动的特征效应。孔穴效应的产

生主要是由区域化变量周期性变化引起的,说明研究区土壤存在周期性的变化^[12-16]。从图 2 可以看出,土壤有机碳密度半方差函数的滞后距离表现为:0—10<30—60<10—30 cm。0—10 cm 的土壤有机碳密度在距离很短(约 9.60 m)的区域内就趋于平稳,这种现象说明表层土壤有机碳密度的变异性在小流域尺度内不明显,而其余两层在小流域范围内均存在相关关系。

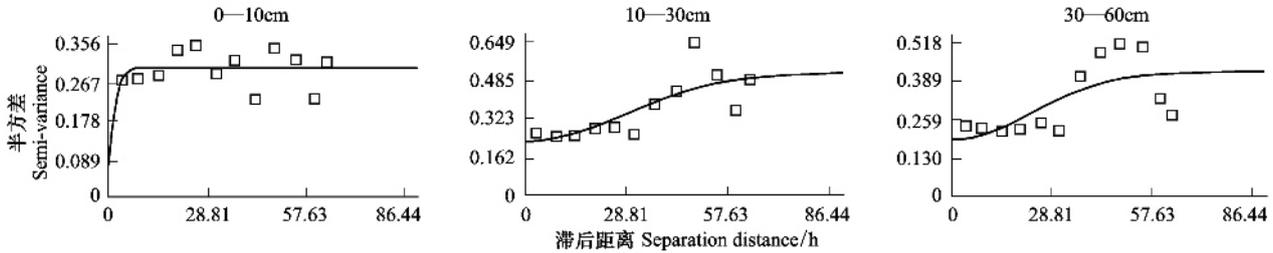


图 2 土壤有机碳密度变异函数模型的拟合曲线

Fig. 2 The Semi-variogram fitting curve of soil organic carbon density

在拟合曲线中,小矩形所指的分离距离是由步长值限定的所有点对的平均距离,纵轴表示其中所有点对的半方差。拟合曲线与小矩形的总体偏离越小,则曲线拟合效果越好。即决定系数 R^2 越大,残差 RSS 越小,曲线的拟合程度越好。土壤有机碳密度的变异函数分别为对数、高斯和高斯模型。

3.3 土壤有机碳密度的空间分布

为直观地反映土壤有机碳密度在流域内的空间分布,以模拟最优的半方差函数理论模型及相关参数。在 GIS 软件的支持下,利用 Kriging 最优内插法,对小流域土壤有机碳密度进行插值,绘制出土壤有机碳密度空间格局插值图(图 3),该图可直观地反映土壤有机碳密度在流域空间各土地利用方式下的分布状况。由于土壤有机碳密度受地理位置、气候条件、土壤类型、植被类型及土地利用方式等因素的共同影响,因此存在复杂的空间变异性。

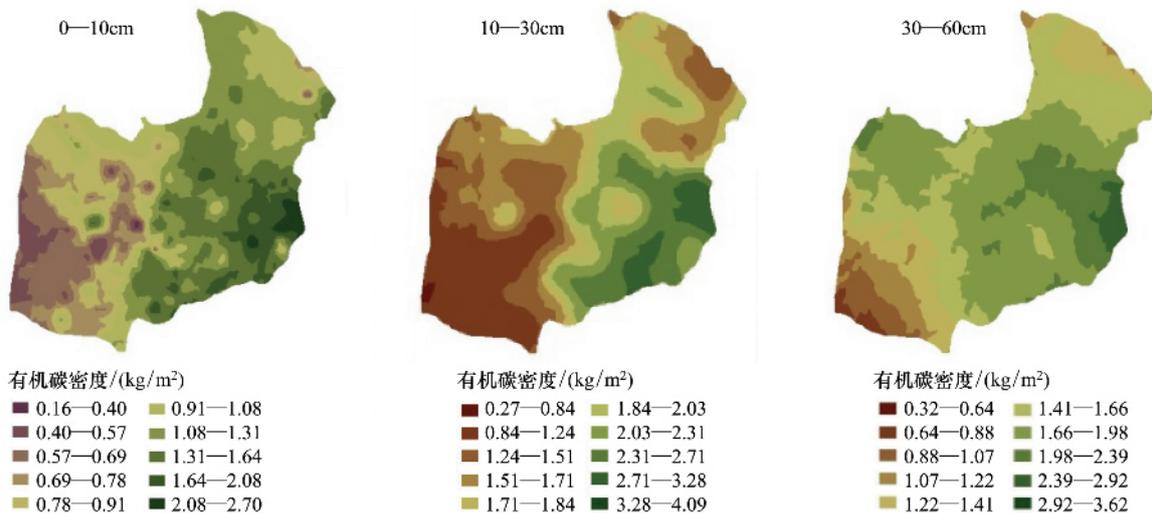


图 3 土壤有机碳密度空间分布

Fig. 3 Spatial variation of soil organic carbon density in different soil layer

图 3 显示了不同土层土壤有机碳密度的空间分布情况。流域各层土壤有机碳密度基本表现为东部大于西部。表层土壤有机碳密度分布不集中,表层土壤碳密度只在较小范围内存在空间变异性。由东向西逐渐减小,小块高值和低值区域分别集中在研究区的东部和西部。其中,土壤碳密度小于 0.69 kg/m^2 的区域占上黄实验区总面积的 20%。10—30 cm 和 30—60 cm 土层则呈规则等高状和条状分布,10—30 cm 碳密度低于 0.84 kg/m^2 的区域占约占实验区面积的 3%,低值区间在 $0.27\text{—}0.84 \text{ kg/m}^2$ 之间,30—60 cm 碳密度低于

0.88 kg/m² 的区域占小流域总面积的 5% , 低值在 0.32—0.88 kg/m² 范围内。随土层深度的增加, 土壤碳密度在逐层递增, 低值范围差异不明显, 但三层小于 0.16—0.88 kg/m² 的碳密度区域面积逐层减小。研究结果表明: 三层土壤有机碳密度具有相似的空间分布特征, 并呈现为东部较高, 西南部最低分布特征。

3.4 不同土地利用方式与坡位下土壤有机碳密度的分布

表 4 为不同土地利用方式下土壤有机碳密度的垂直分布状况, 土壤有机碳密度在不同土地利用方式下的垂直分布差异显著。耕地、果园、人工草地及河滩、河台地表现为土壤有机碳密度随着土层的增加而逐渐增加, 而在灌丛林地、天然草地和撂荒地则表现为 10—30 cm 最高, 30—60 cm 其次, 0—10 cm 最低。具体表现为: 天然草地 > 果园 (2.12 kg/m²) > 灌丛林地 (1.77 kg/m²) > 河滩、河台地 (1.44 kg/m²) > 撂荒地 (1.40 kg/m²) > 人工草地 (1.13 kg/m²) > 耕地。其中天然草地的土壤有机碳密度最高 (2.32 kg/m²), 耕地最低 (0.92 kg/m²)。不同土地利用方式下土壤有机碳密度的分布特征与土壤有机碳含量的分布状况基本保持一致^[21]。土壤有机碳密度在小流域尺度内与气候、地形、土壤母质等结构因素及区域植被类型, 土地利用方式密切相关。其中, 土壤有机碳密度与土壤容重是决定土壤有机碳密度的直接因素^[22-24], 有关研究表明, 自然条件下, 人为干扰少的区域土壤有机碳含量和密度的垂直分布差异显著^[25-26], 天然草地的土壤有机碳密度最高。而连年的深翻耕种破坏了土体结构, 加速土体中有机碳的分解, 而且少量的植物残体不利于有机碳积累, 导致耕地碳密度最低。

表 4 不同土地利用方式土壤有机碳密度的分布

Table 4 The distribution of soil organic carbon density under different land uses

土地利用类型 Land uses	土壤有机碳密度 Soil organic carbon density/(kg/m ²)			
	0—10 cm	10—30 cm	30—60 cm	平均值 Mean
灌丛林地 Shurb land	1.51±0.44	2.06±0.55	1.74±0.67	1.77
人工草地 Manmade grassland	0.76±0.14	1.30±0.26	1.34±0.37	1.13
天然草地 Natural grassland	1.99±0.62	2.71±0.90	2.27±0.98	2.32
果园 Orchard	1.47±0.63	2.42±0.79	2.49±0.94	2.12
河滩、河台地 Terrace land	0.83±0.09	1.55±0.41	1.94±0.67	1.44
耕地 Farmland	0.52±0.15	0.99±0.37	1.26±0.63	0.92
撂荒地 Abandoned land	1.07±0.32	1.67±0.48	1.45±0.47	1.40
平均值 Mean	1.17	1.81	1.78	

3.5 不同土地利用方式下土壤碳储量

图 4 和表 5 为不同土地利用方式下土壤碳储量的分布状况, 灌丛林地和天然草地的碳储量较高, 占总碳储量的 78.72%。土壤有机碳储量是由土壤有机碳密度和各土地利用方式所对应的面积决定的。退耕还林还草使小流域内灌丛林地的占地面积逐渐扩增至 48.79%, 导致其碳储量在各土地利用方式下最高 (22052.81 t)。天然草地的占地面积为 21.64%, 其碳储量 (14573.14 t) 占总储量比例的 31.32%。其余土地利用方式下的碳储量表现为: 耕地 > 果园 > 撂荒地 > 人工草地 > 河滩、河台地。结果表明, 上黄小流域的土壤碳储量主要是由植被恢复过程中, 自然恢复模式下的天然草地和人工恢复模式下的灌丛林地提供的, 植被恢复有利于土壤有机碳储量的增加^[27-28]。

4 讨论

空间异质性是 20 世纪 90 年代生态学研究中的一个极其重要的理论问题, 同时也是生态学家们研究不同空间尺度生态系统功能、过程中最为感兴趣的问题。它以地质统计学为基础, 主要研究具有空间结构性和随机性, 且样品之间具有空间相关性的变量。土壤空间变异性的研究始于 70 年代, Mathem 提出空间变异理论以后。国内外土壤学工作者^[24-26]将其中的区域化变量理论推广和应用到实际研究工作当中, 使得空间变异性在土壤性质的研究方面取得了很大的进展。本文通过将地统计学中的半方差函数与 Kriging 无偏最优内插法

相结合的方法对小流域三层土壤有机碳密度进行空间异质性进行研究,结果表明退耕还林还草,封山育林和土地资源的优化配置等人为干扰因素,会使表层土壤有机碳密度在小流域范围内存在相对较弱的空间异质性。而 10—30 和 30—60cm 土层受随机素相对较少,结构因素(气候、母质、地形、土壤类型等)决定其在流域范围内空间变异较大。

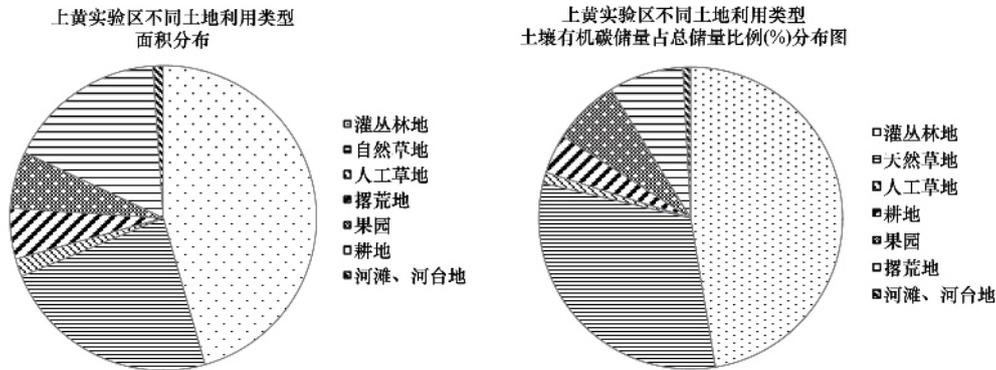


图 4 上黄小流域不同土地利用类型面积及储量分布比例图

Fig. 4 The distribution of soil organic carbon stock under different land uses and theirs' proportion

表 5 上黄小流域不同土地利用方式土壤有机碳储量垂直分布特征

Table 5 The vertical distribution of soil organic carbon stocks under different land uses in Shanghuang

土地利用类型 Land uses	上黄 Shanghuang			
	面积 Area/m ²	所占比例 Percent Area/%	碳储量 TSOC/t	所占比例 Percent TSOC/%
灌丛林地 Shrub land	3489369.30	48.79	22052.81	47.40
天然草地 Natural grassland	1772888.39	21.64	14573.14	31.32
人工草地 Artificial grassland	145410.70	1.78	545.29	1.17
撂荒地 Abandoned land	409727.09	5	1970.79	4.24
果园 Orchard	461402.60	5.63	3294.41	7.08
耕地 Farmlands	1289130.5	15.74	3699.80	7.95
河滩、河台地 Terrace land	85157.13	1.01	390.87	0.84
总计 Total	7653085.71	100	46527.12	100

土壤有机碳是表征土壤肥力的一个重要参数。国内外学者在对土壤有机碳的研究过程中,对其储量在不同土地利用方式下的分布状况及其影响因素进行了大量的研究。Bohn 利用土壤分布图及相关土壤有机碳含量估算了全球土壤有机碳库^[29]。潘根兴^[20]、王少强^[25]等用不同的资料计算了我国土壤有机碳储量。Detwiler 发现如若将热带森林变为农耕地,土壤有机碳含量会减少 40%,变为草地降低 20%^[23]; Schiffman 和 Johnson^[30]指出农田弃耕后土壤有机碳含量增加 35%; Wilde 发现造林 50a 后 0—15 cm 土层的土壤有机碳含量增加了 300%—400%^[31]。这些研究结果表明,土地利用类型对土壤有机碳的影响巨大,尤其是造林后的土壤有机碳含量具有明显增加的趋势。黄土高原是土壤侵蚀、退化及水土流失的严重区域,由于其独特的地貌特征和对土地资源的不合理利用造成土壤贫瘠,水土流失加重、环境恶化。退耕还林还草政策以生态修复和治理为目标,实行土地资源的有效配置。改变原有的土地利用方式,在减少水土流失改善区域生态环境的基础上,增加区域的经济效益、生态效益和社会效益^[30-32]。上黄小流域是退耕还林还草的重点实施区域,经过 30a 的努力,已经成为宁南山区生态治理及经济建设的示范区域。退耕还林还草措施作为一种积极的推动自然演替的管理措施,使土地从耕地向其他土地类型转换的过程中,实现了土壤有机碳的增加。

通过对上黄小流域不同土层土壤有机碳密度的空间异质性与其在不同土地利用方式下的分布特征进行分析。结果表明,土壤有机碳密度在小流域东部的空间异质性最高,其次为中部带状区域。这与土壤有机碳密度最高的天然草地分布于小流域的东部,碳储量最大的灌丛林地大面积的分布于中部带状区域相吻合。

5 结论

(1) 小流域各层土壤有机碳密度的块金系数为: 77.3%、50.7% 和 53.3% ,除表层土壤变异性较弱外,其它两层为中等强度变异。中等强度变异主要是由空间自相关部分(结构因素)引起的,随机因素影响的变异不占主导地位。自相关变异主要包括气候、母质、地形、土壤类型等结构因素,导致的土壤具有较强的空间异质性。

(2) 土壤有机碳含量随土壤深度的增加而减小,而土壤有机碳密度则表现为 10—30 cm 最高。不同土地利用方式下的土壤有机碳密度表现为: 天然草地>果园>灌丛林地>河滩、河台地>撂荒地>人工草地>耕地。小流域东部与中部带状区域的土壤有机碳密度最高,这与空间变异性结果相一致。由于小流域各土地利用方式下土壤碳密度及对应面积的差异,导致储量的差异。灌丛林地(22052.81 t)和天然草地(14573.14 t)的土壤碳储量最高,占区域总储量的 78.72%。

参考文献(References):

- [1] Fu B J, Gulinc H, Masum M Z. Loess erosion in relation to land use changes in the Ganspoel Catchment, Central Belgium. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1994, 5(4): 261-270.
- [2] 陈利顶,张淑荣,傅伯杰,彭鸿嘉. 流域尺度土地利用与土壤类型空间分布的相关性研究. *生态学报*, 2003, 23(12): 2497-2505.
- [3] 傅伯杰,陈利顶,马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响—以延安羊沟圈流域为例. *地理学报*, 1999, 54(3): 241-246.
- [4] 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. *地域研究与开发*, 2006, 25(3): 94-99.
- [5] Batjes N H. Soil carbon stocks and projected changes according to land use and management: a case study for Kenya. *Soil Use and Management*, 2004, 20(3): 350-356.
- [6] Ritchie J C, McCarty G W, Venteris E R, Kaspar T. C. Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape. *Geomorphology*, 2007, 89(1/2): 163-171.
- [7] 郭胜利,刘文兆,史竹叶,侯喜禄,李凤民. 半干旱区流域土壤养分分布特征与其地形、植被的关系. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 40-43.
- [8] 方华军,杨学明,张晓平,梁爱珍,申艳. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布. *生态学报*, 2006, 26(9): 2847-2854.
- [9] 李壁成,焦锋. 固原上黄试区土地利用动态监测与分析评价. *水土保持研究*, 1996, 3(1): 14-21.
- [10] 孙维侠,史学正,于东升,王库,王洪杰. 基于 1: 100 万土壤空间数据库的有机碳储量估算研究—以中国东北三省为例. *地理学报*, 2004, 24(5): 568-572.
- [11] Webster R. Quantitative Spatial analysis of soil in the field. *Advance in Soil Science*, 1985, 3: 1-70.
- [12] 李哈滨,吴业刚. 景观生态学的数量研究方法 // 刘建国. 当代生态学博论. 北京: 中国科学, 1992.
- [13] Issaks E H, Srivastea R M. An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989.
- [14] 王仁铎,胡光道. 线性地质统计学. 北京: 地质出版社, 1987.
- [15] 侯景润,郭光裕. 矿床统计预测及地质统计学的理论与应用. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [16] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [17] 李哈滨,王政权,王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 651-657.
- [18] 金峰,杨浩,蔡祖聪,赵其国. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. *土壤学报*, 2001, 38(4): 522-528.
- [19] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, King A W, Dale V H, DeAngelis D L. The global carbon cycle. *American Scientist*, 1990, 78: 310-326.
- [20] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. *科技通报*, 1999, 15(5): 330-332.
- [21] 薛志婧,侯晓瑞,程曼,安韶山. 黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳空间异质性. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 160-168.
- [22] 王绍强,周成虎,李克让,朱松丽,黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [23] Detwiler R P. Land use change and the global carbon cycle: The role of tropical soils. *Biogeochemistry*, 1986, 2(1): 67-93.
- [24] 陈肖,张世榕,黄丽琴,代英,吴若玉. 成都平原土壤氮素的空间分布特征及其影响因素研究. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 1-7.
- [25] Moore I D, Gessler P E, Nieslen G A, Peterson G A. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, 57: 443-452.
- [26] Brubaker S C, Jone A J, Lewis D T, Frank K. Soil properties associated with landscape position. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, 57: 235-239.
- [27] 马玉红,郭胜利,杨雨林,王小利,杨光. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 97-105.
- [28] 张希彪,上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响. *生态学报*, 2006, 26(2): 373-382.
- [29] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40: 468-470.
- [30] Schiffman P M, Johnson W C. Phytomass and detritus storage during forest regrowth in the southeastern United States Piedmont. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 19: 69-78.
- [31] Wilde S A. Changes in soil productivity induced by pine plantations. *Soil Science*, 1964, 97(4): 276-278.
- [32] 安慧,韦兰英,刘勇. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 611-619.