

小流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究

——以内蒙古赤峰市黄花甸子流域为例

李 龙¹, 吴丽芝¹, 姚云峰¹, 秦富仓², 郭月峰¹, 焦素香³, 高云波³

(1. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古农业大学 林学院, 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古赤峰市敖汉旗水利局, 内蒙古 赤峰 024300)

摘 要:选择内蒙古赤峰市敖汉旗黄花甸子流域为研究对象,运用地统计学和 ArcGIS 空间分析工具相结合的方法研究流域内土壤有机碳含量的空间变异特征以及地形因子对其的影响,旨在为半干旱区土壤碳库的研究提供参考。结果表明:研究区表层(0—20 cm)与全剖面(0—100 cm)土壤有机碳平均含量分别为 7.54 g/kg 和 6.19 g/kg,二者块金基台比均较小,为 22.77%~28.36%,说明流域土壤有机碳的空间变异主要是由结构性因素引起的,随机因素对其变异影响较小。地形因子对土壤有机碳的影响表现为:土壤有机碳含量随坡度的增加而降低;不同坡向土壤有机碳含量由高到低呈现出阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡的明显分布规律;土壤有机碳含量随海拔增加呈现先增加后降低的抛物线走势。

关键词:土壤有机碳; 空间变异; 地形因子; 地统计

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)05-0018-06

Study on Spatial Variations of Soil Organic Carbon in Small Watershed

—Taking Huanghuadianzi Watershed as An Example

LI Long¹, WU Li-zhi¹, YAO Yun-feng¹, QIN Fu-cang², GUO Yue-feng¹, JIAO Su-xiang³, GAO Yun-bo³

(1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010018, China; 2. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010018, China; 3. Water Conservancy Bureau, Chifeng, Inner Mongolia 024300, China)

Abstract: This paper selected Huanghuadianzi watershed in Aohan of Chifeng, Inner Mongolia as the research site, and the spatial variations of soil organic carbon contents were analyzed through the combination of Geo-statistical and ArcGIS in order to provide reference for the study on soil carbon pool in semi-arid area. The results showed that the overall mean of soil organic carbon content in the surface layer (0—20 cm) and the whole soil profile (0—100 cm) were 7.54 g/kg and 6.19 g/kg, respectively, and values of nugget-to-sill were 22.77%~28.36%, indicating that spatial variability of soil organic carbon pool was mainly caused by structural factors, and the random factors had little effects. The effects of topographic factors on soil organic carbon showed that soil organic carbon content decreased with the increase of slope, soil organic carbon contents presented an obvious distribution law such as shady slope>semi-shady slope>semi-sunny slope>sunny slope, and soil organic carbon content increased at first and then decreased with a parabolic trend altitude. This study gave a scientific basis for the distribution and the system management and reasonable evaluation of soil organic carbon.

Key words: soil organic carbon; spatial variations; topographic; geostatistics

全球陆地生态系统中,土壤碳库为 1 200~2 500 Pg (1 Pg=10¹⁵g)^[1-2],是大气碳库的 2 倍,是陆地生物圈碳库的 2~3 倍,土壤碳库的微小变动都将对整

个陆地生态系统碳库产生巨大影响,在维持陆地生态系统的碳平衡中发挥着重要作用^[3-4]。影响土壤碳库空间变异的因素主要分为自然因素和人为因素两类,

收稿日期:2013-07-12

修回日期:2013-08-24

资助项目:内蒙古应用研究与开发计划项目“农林牧耦合生态系统固碳关键技术”(20110732)

作者简介:李龙(1989—),男,吉林省桦甸市人,硕士研究生,主要研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:lilongdhr@126.com

通信作者:吴丽芝(1961—),女,河北省唐山市人,副教授,主要从事水土保持与荒漠化防治领域的工作。E-mail:wulizhi1950@yahoo.com.cn

其中自然因素主要以气候、植被、土壤、地形地貌为主。在以小流域为研究对象时,气候与土壤相对稳定单一,对土壤有机碳的干扰相对较小,而地貌的起伏变化对土壤有机碳的空间变异影响更为显著^[5]。地形是成土过程中的一个重要因素,它不但支配着地表和土壤中水热资源的重新分配,而且影响着土壤生态系统的物质循环过程和强度,对土壤有机碳的空间变异有着深远影响^[6]。其主要以不同的坡度、坡向、坡位海拔等因素来控制区域的水热再分配,从而影响土壤有机碳的空间变异特性^[7]。然而目前对地形因子的研究多是借助 GIS 对大尺度研究区进行分析^[8],以小流域为单元的小尺度土壤碳库的研究中,土壤有机碳含量的空间变异特征分析还鲜有报道。尤其是以高程、坡度、坡向作为影响土壤有机碳的主导因子,在不同研究区对土壤有机碳的影响作用也具有明显差别。同时,高程、坡度、坡向等因子对土壤含水率、有机质含量以及土壤微生物等有着重要影响,这些因素对土壤有机碳的空间变异都有着不同程度的影响^[9-11]。

内蒙古赤峰市敖汉旗位于半干旱地区,属于温带大陆性季风气候,在我国碳汇林营造中起步较早,规模较大,其中在敖汉旗的中意合作项目“中国东北部内蒙古敖汉旗防治荒漠化青年造林项目”是我国第一个碳汇造林项目,其造林面积达 3 000 hm²,对我国其他地区的碳汇研究工作具有积极的借鉴作用,对这一地区的土壤碳库研究更具指导价值。因此,以内蒙古自治区赤峰市敖汉旗黄花甸子流域为研究对象,以实地调查土壤数据为基础,结合 GIS 地理信息系统与地统计学,分析流域土壤有机碳的空间变异特征及影响因素,为土壤碳库的研究提供科学参考和基础数据。

1 实验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于赤峰市敖汉旗西部的黄花甸子流域。流域位于老哈河中游南岸,科尔沁沙地南缘。地处 42°17′—42°33′N,119°36′—119°53′E,面积约为 30 km²,东临通辽市奈曼旗,西与辽宁省建平县接壤,南与辽宁省朝阳市、北票市毗邻,北与赤峰市松山区、翁牛特旗隔老哈河相望。流域内总体属于低山丘陵区,地势起伏不大,海拔 440~806 m。属于中温带半干旱大陆性季风气候区,四季分明。年均降雨量 400~470 mm,年均蒸发量为 2 290~2 400 mm。全年日照数 2 940~3 060 h,历年平均日照数 2 999.3 h,10℃以上积温为 3 189℃。春季风力大,持续时间较长,年平均风速 4~6 m/s。土壤类型大部分为栗钙土,伴

随着少量的风沙土,体现了森林土壤向草原土壤过渡的特点,pH 值呈弱碱性到碱性,全剖面具有石灰反应。该流域主要有天然草地、灌丛林、乔灌混交林、针阔混交林和阔叶纯林等森林植被类型,主要以人工植被为主。

1.2 研究方法

地统计学(Geostatistics)也称为地质统计学,于 20 世纪 50 年代初开始形成,在法国著名统计学家 G. Matheron 的大量理论研究工作基础上形成的一门新的统计学分支。地统计学是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法。半变异函数又称半变差函数、半变异矩,是地统计分析的特有函数。区域化变量 $Z(x)$ 在点 x 和 $x+h$ 处的值 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 差的方差的一半称为区域化变量 $Z(x)$ 的半变异函数,记为 $r(h)$, $2r(h)$ 称为变异函数^[12]。

根据定义有:

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

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

1.2.1 土壤样品采集 结合流域 1:5 万地形图、土地利用现状图,于 2012 年 7 月采用网格法采集研究区土壤样品,兼顾代表性和均匀性的原则,每个样地内采用 S 法共确定 4 个采样点^[13]。每两个相邻采样点间隔约为 5 m,保证取样均匀,充分涵盖样地的自然特征;每个样点挖掘深 1 m,长 2 m,宽 1.5 m 土壤剖面,按 0—20 cm,0—100 cm 划分两个层次分土层取土,每层取 3 个重复,共计 37 个样地,148 个土壤剖面。将每个样地内 4 个样点采得土壤样品均匀混合,以降低采样中系统误差及异常样点的干扰。采用重铬酸钾氧化法测定表层(0—20 cm)和全剖面(0—100 cm)土壤有机碳含量。

1.2.2 数据提取 本文研究土壤有机碳含量的空间异质性,并分析以地形为主导因子的不同高程、坡度、坡向对土壤有机碳含量的影响。在 ArcGIS 10.0 软件支持下,根据流域 DEM 数据提取流域高程、坡度、坡向信息并划分等级生成涵盖整个研究区高程、坡度、坡向信息的地形因子图。

1.2.3 数据处理 采用手持 GPS 标记各采样点坐标并分别导入 GS+7.0 和 ArcGIS 10.0 软件,生成具有土壤有机碳信息的采样点数据,用以进行半方差函数计算以及克里格空间插值分析。基于地统计学原

理,采用 GS⁺ 7.0 软件完成半方差函数计算和理论模型拟合,并结合 ArcGIS 软件 Geostatistical Analyst 工具,对采样点土壤有机碳含量进行克里格插值,生成研究区土壤有机碳含量的空间分布图。利用 ArcGIS 空间分析工具将研究区海拔高度、坡度、坡向分布图分别与土壤有机碳含量分布图叠合进行区域统计,从而生成地形因子与土壤有机碳含量的空间数据库,建立单一地形因子与土壤有机碳含量的关系。采用 SAS 软件进行典型相关性分析,得出地形因子影响土壤有机碳含量的显著水平。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳储量的描述性统计分析

如表 1 所示,全剖面(0—100 cm)土壤的有机碳

表 1 土壤有机碳含量的描述性统计

土层	最小值/ (g·kg ⁻¹)	平均值/ (g·kg ⁻¹)	最大值/ (g·kg ⁻¹)	标准差	变异系数/ %	偏度	峰度	分布类型
表层(0—20 cm)	1.13	7.54	19.59	3.50	46.45	1.16	5.28	对数正态分布
全剖面(0—100 cm)	2.11	6.19	14.60	2.54	40.99	0.99	4.73	对数正态分布

2.2 土壤有机碳含量空间变异的地统计学分析

经典统计学方法只能从整体上描述土壤有机碳含量的部分特征,无法反映其内部空间变异性。为解决这一问题,本研究应用地统计学方法定量地刻画土壤有机碳含量的随机性和结构性,可以更加细致准确地分析土壤有机碳含量的空间变异结构。

半方差函数的计算一般要求数据符合正态分布,否则可能存在比例效应,比例效应的存在会抬高块金值和基台值,降低估计精度,使某些潜在的特征不明显^[16]。因此,本研究采用 ArcGIS 的 Normal QQ Plot 图对研究区表层及全剖面土壤有机碳含量进行正态分布检验,并对其进行对数转换,使得转换后数

平均含量为 6.19 g/kg,而表层(0—20 cm)土壤有机碳的平均含量为 7.54 g/kg,是全剖面土壤的 1.22 倍(表 1)。表层土壤有机碳含量远高于整个土壤剖面碳含量的平均值,在有机碳的积累上表层土壤起着更为积极的作用^[14]。就变异系数而言,表层土壤有机碳变异系数为 46.45%,全剖面土壤有机碳变异系数 40.99%。按照变异等级的划分标准(弱变异性,变异系数 CV<10%;中等变异性,10%≤CV≤100%;强变异性,CV>100%)^[15],表层土壤与全剖面土壤均具有中等强度的空间变异性。

表层土壤有机碳含量的极差、标准差、变异系数、偏度以及峰度均大于全剖面土壤,从以上各指标的对比分析均反映了表层土壤的空间分布较全剖面土壤的离散程度更大,具有更强的空间变异性。

据均服从正态分布,用以进行半方差函数的拟合。通过 GS⁺ 软件分析得出,土壤有机碳含量的半方差函数值在各个方向上均表现出相同的特性,因此半方差函数均按各向同性进行计算,通过模型的对比分析和参数的调整最终得出土壤有机碳含量的半方差函数理论模型及相关参数。

如表 2 所示,表层土壤与全剖面土壤有机碳含量的半方差函数均符合 Gaussian 模型,其决定系数均在 0.299~0.423 之间,数值较小,说明模型具有较好的拟合效果,能够客观地反映土壤有机碳含量的空间结构特征。半方差函数主要通过块金值、基台值、变程等参数来评价函数的空间变异特征。

表 2 土壤有机碳含量的半方差函数理论模型及相关参数

土层	模型	块金值 C ₀	基台值 (C+C ₀)	变程/m	残差	决定系数 R ²	块金值/基台值 [C ₀ /(C+C ₀)]/%
表层(0—20 cm)	Gaussian	0.012395	0.043708	798.16	2.24E-03	0.423	28.36
全剖面(0—100 cm)	Gaussian	0.013812	0.060648	1697	5.12E-03	0.299	22.77

块金值(C₀)表示由实验误差和小于实际取样尺度引起的变异,即随机部分引起的空间异质性。基台值(C+C₀)通常表示系统空间内总变异,块金值与基台值之比描述了系统变量空间相关性的程度或空间变异的性质^[17]。块金值与基台值之比表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比例,如果该比值高,说明随机部分引起的空间异质性程度较大,相反,则表明由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大。从结构性因素的角度来看,若比值小于 25%,说

明系统具有强烈的空间相关性;若比值为 25%~75%,则表明系统内具有中等的空间相关性;若比值大于 75%,则说明系统内空间相关性很弱^[18]。

表层土壤有机碳的 C₀/(C+C₀)为 28.36%,属于中等程度空间相关性,这与经典统计学的结果相吻合,说明研究区表层土壤有机碳的空间变异是由随机因素和结构性因素共同引起的。然而,表层土壤的块金值为 0.012 395,C₀/(C+C₀)也仅为 28.36%,随机因素所引起的空间异质性占比并不大,结构性因素依

旧在土壤有机碳空间异质性中起着较为显著的作用。其中结构性因素如气候、母质、地形、土壤类型等因素起到增强土壤有机碳空间相关性的作用,而随机性因素主要表现为人为活动,土壤受耕作、施肥等人为活动的影响使得其有机碳含量的空间相关性减弱^[19],正是这种随机因素和结构性因素的共同作用,使得表层土壤有机碳表现为中等程度的空间相关性。全剖面土壤有机碳的 $C_0/(C+C_0)$ 为 22.77%,属于强烈空间相关性,这说明研究区内全剖面土壤有机碳的空间变异主要是由结构性因素引起的,受人为因素影响较小。

研究区土壤有机碳的空间相关性表现为 0—100 cm 深度全剖面土壤大于表层(0—20 cm)土壤。究其原因,施肥、种植制度以及耕作措施等人为活动长期作用于表层土壤,这种随机因素的介入破坏了表层土壤原有的空间相关性,使得其变异性增强;随着土层深度的增加,人为活动对土壤的影响逐渐减低,深层土壤仍旧保持着气候、地形等自然因素长期作用而形成的空间自相关关系。即便表层土壤发生改变,对于 0—100 cm 深度的全剖面土壤有机碳的均值而言,自然因素对其的影响仍旧占据主要地位。

变程是地统计学理论模型分析中的一个重要参数,其大小反映了区域化变量空间异质性的尺度或空间自相关尺度^[18]。全剖面土壤有机碳的变程为 1 697 m,远大于表层土壤有机碳含量的变程 798.16 m,这表明全剖面土壤有机碳较表层土壤在更远的距离范围内仍然具有空间相关性。如附图 4 所示,研究区表层土壤有机碳含量的分布与全剖面土壤有机碳含量的分布规律基本一致,均呈现出流域西北部土壤有机碳含量较高,流域中部及西南部有机碳含量较低;由于表层土壤有机碳的变程较小,空间相关距离较短,表层土壤呈现较为破碎的斑块状分布,而全剖面土壤有机碳含量的分布呈现岛状分布,并表现为较为明显的过渡性。如附图 5 所示,土壤有机碳含量的水平分布和坡度、坡向以及高程在研究区的分布具有较为明显的相关性,地形因子的空间变化对研究区的光照、降水再分配以及地上植被的地带性分布都有着极为显著的作用,对土壤有机碳含量空间变异产生重要的影响。

2.3 地形因子对土壤有机碳含量的影响

研究区位于内蒙古赤峰市黄花甸子流域,流域总面积约为 30 km²,气候与土壤相对均一,对土壤有机碳的空间变异影响较小,因此本研究将地形因子作为影响土壤有机碳空间变异的主要结构性因素,分析坡度、坡向、海拔对土壤有机碳含量的影响。

2.3.1 坡度对土壤有机碳含量的影响 在 ArcGIS

软件下根据流域 DEM 数据提取流域坡度,并将坡度以 5°为一个单元等距划分为 0°~5°,5°~10°,10°~15°,15°~20°,20°~25°, >25°共 6 个级别。将研究区有机碳含量分布图与坡度图相叠加,得出坡度与土壤有机碳含量的关系曲线(图 1)。

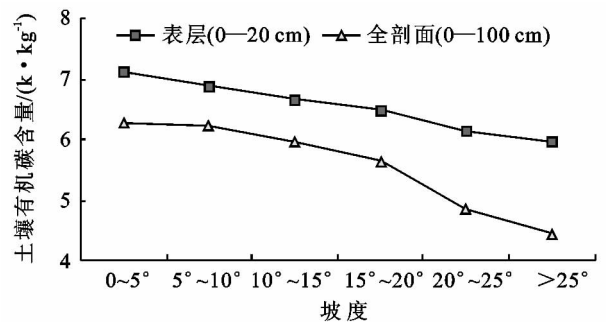


图1 坡度与土壤有机碳含量的关系

由于研究区地势变化相对明显,不同坡度等级下其水土保持措施、地表覆盖以及水文特征等要素各异,因此更加剧了不同坡度等级间土壤有机碳含量变异。如图 1 所示,表层(0—20 cm)与全剖面(0—100 cm)土壤有机碳含量均随坡度的增加而降低,且在 0~5°坡度范围内表层与全剖面土壤有机碳含量均达到最大值,分别为 6.26 g/kg,7.10 g/kg;坡度 >25°范围土壤有机碳含量达到最小值,分别为 4.45 g/kg,6.07 g/kg。相同坡度范围内表层土壤有机碳含量大于 0—100 cm 深度的全剖面土壤有机碳含量,这是由于表层土壤中,动植物残体以及土壤腐殖质积累较多,使得表层土壤有机碳含量的积累明显大于整个剖面土壤。典型相关分析表明,不同坡度对土壤有机碳含量的影响差异显著,且具有极显著的相关性($p < 0.001$)。流域内坡度较小的地区(0~10°)基本位于坡脚,土壤母质属坡积物、河流冲击物;这一地区土壤养分含量较高,有机碳富集,地上植被生长较好,因而土壤有机碳含量较高^[20]。随着坡度的增加,土壤侵蚀加剧,土地肥力下降,有机质积累降低,以致较高坡度地区(15°~25°)的土壤有机碳含量较低。当坡度 >25°以后,土壤侵蚀严重,地表裸露,植物向土壤输送的有机质也明显减少^[21]。因此,从土壤侵蚀的角度可以较好地解释研究区土壤有机碳含量随坡度的增加而降低的现象。

2.3.2 坡向对土壤有机碳含量的影响 在 ArcGIS 软件下根据流域 DEM 数据提取流域坡向,并将坡向以 22.5°为一个单元等距划分,按顺时针方向从 0 (正北方向)到 360°(重新回到正北方)0~22.5°,22.5°~45°,45°~67.5°,67.5°~90°,90°~112.5°,112.5°~135°,135°~157.5°,157.5°~180°,180°~202.5°,202.5°~225°,225°~247.5°,247.5°~270°,270°~

292.5°, 292.5°~315°, 315°~337.5°, 337.5°~360°共16个级别。将研究区有机碳含量分布图与坡向图相叠加,对数据进行整理得出坡向与土壤有机碳含量的关系曲线(图2)。

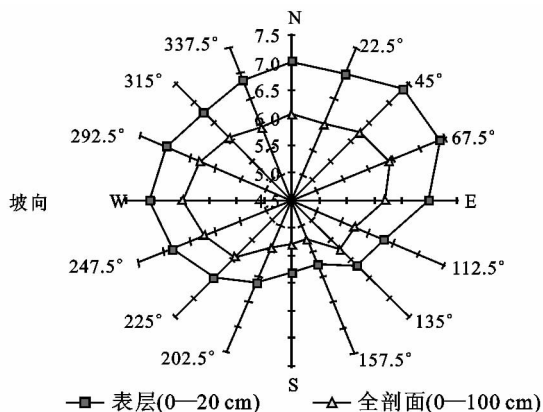


图2 坡向与土壤有机碳含量的关系

如图2所示,全剖面(0—100 cm)土壤有机碳含量最大值出现在正西方(270°方向),为6.5 g/kg,从这一坡向分别向南和向北方向有机碳密度呈现逐级递减趋势,到达337.5°和157.5°时停止,并在157.5°时达到最小值,为5.3 g/kg。表层(0—20 cm)土壤有机碳含量最大值出现在北偏东67.5°方向,为7.4 g/kg,从这一坡向分别向南和向北方向有机碳密度呈现逐级递减趋势,到达315°和157.5°时停止下降,并在157.5°时达到最小值,为5.7 g/kg。0—20 cm与0—100 cm两层土壤有机碳含量随坡度的变化规律基本一致,坡向在22.5°~67.5°间的地区为土壤有机碳含量高值区域,其均值分别为7.3 g/kg和6.2 g/kg,坡向在135°~202.5°之间的地区为土壤有机碳含量低值区,其均值为6.9 g/kg和5.4 g/kg。依据坡向分级标准划分阴坡:北(337.5°~22.5°)、东北(22.5°~67.5°);半阴坡:东(67.5°~112.5°)、西北(292.5°~337.5°);半阳坡:东南(112.5°~157.5°)、西(247.5°~292.5°);阳坡:南(157.5°~202.5°)、西南(202.5°~247.5°)^[22]。不同坡向下的有机碳含量呈现出阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡的明显分布规律。

坡向对土壤有机碳含量的影响主要表现在影响土壤的光热条件^[23]。处于阳坡的土壤有机碳含量明显小于其他坡向地区的土壤有机碳含量,究其原因,阳坡土壤受光照时间长,强度大,使得土壤水分蒸发强烈,土壤风化严重,不利于有机质的形成和积累;土壤温度较高,土壤微生物活动强烈,有机质分解速率增强;同时阳坡植被蒸腾量大,有机质的合成缓慢,从而向土壤输送有机质量降低,导致土壤有机碳含量下降^[24]。相同的植物在阴坡、半阴坡等地区生长过程中光照适度,有利于植物光合作用和碳水化合物的形

成,使植物向土壤输送有机质增加,从而使得阴坡土壤具有较高的有机碳含量。因此土壤有机碳含量从阳坡到阴坡呈现出较为明显的有小的分布趋势。

2.3.3 海拔对土壤有机碳含量的影响 研究区海拔530~810 m,在ArcGIS软件支撑下根据流域DEM数据提取流域海拔,并将高程以50 m为一个单元等距划分为<550 m, 550~600 m, 600~650 m, 650~700 m, 700~750 m, >750 m共6个级别。将研究区有机碳密度分布图与高程图相叠加,对数据进行整理得出高程与土壤有机碳密度的关系(图3)。

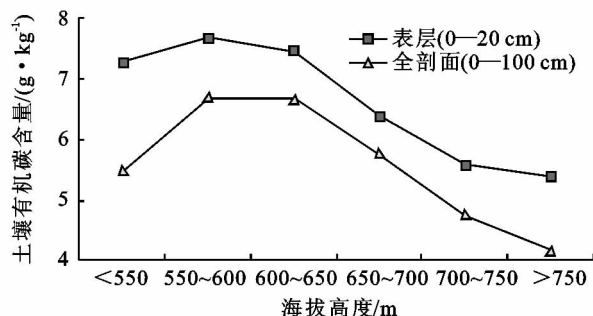


图3 海拔高度与土壤有机碳含量的关系

如图3所示,随海拔高度的增加,0—20 cm与0—100 cm两层土壤有机碳含量均呈现先增加后降低的抛物线走势,土壤有机碳含量在550~600 m出现最高值,分别为7.7 g/kg与6.7 g/kg,此后随海拔的增加,有机碳含量逐渐降低,在>750 m时出现最低值,分别为5.4 g/kg与4.2 g/kg。方差分析表明不同海拔对有机碳含量的影响极为显著($p<0.001$)。

海拔影响植被和土壤的垂直地带性分布,不同植被对土壤有机碳含量的贡献不同,中、低海拔地区受人类的生产活动影响较大,以农田、人工林为主,作物具有良好的农业灌溉条件,作物产量与林分郁闭度均较高海拔地区高,有机质积累量大,向土壤输送的有机碳较高^[19]。而由于部分地区地势过于低洼,加之人为不合理的灌溉影响使得部分地区排水不畅,形成大面积盐碱地,因此对于<550 m的地区土壤有机碳含量并不高。随着海拔增加,太阳辐射强度增强,影响土壤水分的固持,不利于作物生长,加之高海拔地区也不宜大型农业机械的作业,植被以天然次生林、天然草地为主要植被类型,地下生物量较低,同时土壤也出现不同程度的沙化,因此高海拔地区土壤的固碳能力降低。

3 结论

研究区表层(0—20 cm)土壤有机碳平均含量为7.54 g/kg,属于中等程度空间相关性;全剖面(0—100 cm)土壤有机碳平均含量为6.19 g/kg,属于强烈

空间相关性。两层土壤有机碳由随机因素引起的变异较小,而其空间变异是由以地形因子为主的结构因素引起的。研究区西北部土壤有机碳含量较高,研究区中部及西南部有机碳含量较低。表层土壤呈现较为破碎的斑块状分布,而全剖面土壤有机碳含量的分布呈现岛状分布,并表现为较为明显的过渡性,这一现象进一步说明表层土壤较全剖面土壤有着更为强烈的空间变异性。

地形因子对土壤有机碳含量的影响表现为,土壤有机碳含量随坡度的增加而降低。不同坡向对土壤有机碳含量的影响呈现出阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡的明显分布规律。随着海拔高度的增加,土壤有机碳含量均呈现先增加后降低的抛物线走势,土壤有机碳含量在 550~600 m 出现最高值,此后随海拔的增加,有机碳含量逐渐降低。

参考文献:

- [1] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, et al. The global carbon cycle[J]. American Scientist, 1990, 78(4): 310-326.
- [2] Bohn H. Estimate of organic carbon in world soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(3): 468-470.
- [3] 陈泮勤,地球系统碳循环[M]. 北京:科技出版社,2004.
- [4] 苏永中,赵哈林.土壤有机碳储量影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠,2002,22(3):220-228.
- [5] 杨尚斌,温仲明,张佳.基于自然植被的延河流域农田生态系统土壤固碳潜力评估[J]. 干旱地区农业研究, 2010,28(5):212-217.
- [6] 李林海,郜二虎,梦梦,等.黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征[J]. 生态学报,2013,33(1):180-187.
- [7] 杜有新,吴从建,周赛霞,等.庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征[J]. 应用生态学报,2011,22(7): 1675-1681.
- [8] 揣小伟,黄贤金,赖力,等.基于 GIS 的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2011,27(9):2-6.
- [9] 秦松,樊燕,刘洪斌,等.地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究[J]. 水土保持研究,2008,15(1):47-52.
- [10] 宋丰骥,常庆瑞,钟德燕.黄土高原沟壑区土壤养分空间变异及其与地形因子的相关性[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(12):167-180.
- [11] 冯伟,张万军,冯学赞.农牧交错区地形土壤因子与植物群落关系研究:以丰宁小坝子为例[J]. 水土保持研究,2006,13(5):209-211.
- [12] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology,1963,58(8):1246-1266.
- [13] 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.
- [14] 张俊华,李国栋,南忠仁,等.黑河中游不同土地利用类型下土壤碳储量及其空间变化[J]. 地理科学,2011,31(8):983-988.
- [15] 张玉铭,毛任钊,胡春胜,等.华北太行山前平原农田土壤养分的空间变异性研究[J]. 应用生态学报,2004,15(11):2049-2054.
- [16] 郭旭东,傅伯杰.河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征:变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报, 2000,55(5):555-566.
- [17] 王仁铎,胡光道.线性地质统计学[M]. 北京:地质出版社,1988.
- [18] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [19] 王波,毛任钊,曹健,等.海河低平原区农田重金属含量的空间变异性:以河北省肥乡县为例[J]. 生态学报, 2006,26(12):4083-4090.
- [20] 唐国勇,黄道友.红壤丘陵景观表层土壤有机碳空间变异特点及其影响因子[J]. 土壤学报,2010,47(4):754-759.
- [21] 贾松伟.黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究[J]. 水土保持研究,2009,16(2):30-33.
- [22] 刘殿军.赤峰市敖汉旗小流域防护林空间对位配置研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [23] 赫晓慧,温仲明.小流域地形因子影响下的土壤水分空间变异性研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):80-87.
- [24] 李笑吟,毕华兴,张志,等.晋西黄土区坡面尺度地形因子对土壤水分状况的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006,28(4):52-56.