DOI: 10.5846/stxb201710081779

李龙,秦富仓,姜丽娜,姚雪玲.赤峰市敖汉旗土壤有机碳含量的垂直分布及其影响因素.生态学报,2019,39(1): - . Li L, Qin F C, Jiang L N, Yao X L. Vertical distribution of soil organic carbon content and its influencing factors in Aaohan, Chifeng. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(1): - .

赤峰市敖汉旗土壤有机碳含量的垂直分布及其影响 因素

李龙^{1,*},秦富仓¹,姜丽娜²,姚雪玲³

1 内蒙古农业大学,沙漠治理学院,呼和浩特 010011
2 中国林业科学研究院林业新技术研究所,北京 100091
3 中国林业科学研究院林业荒漠化研究所,北京 100091

摘要:选取内蒙古赤峰市敖汉旗为研究对象,运用广义相加模型—分析敖汉旗 0—100 cm 深度土壤有机碳含量的空间变异特征,分析影响土壤有机碳空间变异的主导因素。结果表明,0—100 cm 深度土壤有机碳含量的变化范围为 0.23—20.71 g/kg,且随着土壤深度的增加有机碳含量逐渐降低。广义相加模型可以较为准确地解释土壤有机碳含量与环境因素之间的关系。植被因素的变化是影响表层土壤有机碳含量最重要的因素;在深层土壤中,含水率的变化是影响有机碳含量的主要因素。影响土壤 有机碳空间变异的主导因素随着土壤深度的变化也表现出较大的差异。 关键词:土壤有机碳;土壤深度;广义相加模型(GAM);半干旱区

Vertical distribution of soil organic carbon content and its influencing factors in Aaohan, Chifeng

LI Long^{1,*}, QIN Fucang¹, JIANG Lina², YAO Xueling³

1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2. Research Institute of Forestry New Technology, Beijing 100091, China

3. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: In this study, a soil survey was carried out in Aohan County in Chifeng, Inner Mongolia. A generalized additive model (GAM) was used to analyze the spatial variability of the soil organic content (SOC) in soil depths of 0—100 cm. The results showed that SOC varied from 0.23 to 20.71 g/kg in 0—100 cm soil depths, and decreased gradually with increasing soil depths. The GAM fitted the relationship between SOC and environmental factors well. With increasing soil depth, SOC also varied. Vegetation was the dominant factor affecting SOC in surface soil; soil moisture was the dominant factor affecting SOC in deeper soil. The dominant factors that influenced the variation of soil organic carbon also showed considerable differences with increasing soil depth.

Key Words: soil organic carbon; soil depth; Generalized Additive Model(GAM); semi-arid zone

在全球气候变化的大背景下,土壤碳库作为陆地生态系统的最大碳库,其碳储量及影响因素都是人们关注的焦点^[1]。土壤碳库在维持陆地生态系统的碳平衡发挥着十分重要的作用,土壤碳库的微小变动都将对

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41807079)

收稿日期:2017-10-08; 网络出版日期:2018-00-00

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail:

整个陆地生态系统碳库产生巨大的影响^[2]。土壤有机碳作为土壤碳库中重要组成部分之一,其性质十分活 跃,是陆地生态系统碳平衡的重要参与者,土壤有机碳具有明显的空间变异性,受自然环境和人为活动的影 响,各种外界环境因素和土壤的内部属性都直接或间接地对土壤有机碳的空间分布格局产生着重要影响。陆 地生态系统碳循环中,海拔、坡度、坡向等地形因素通过改变局部地区的水热条件,使得不同地区土壤有机碳 的累积和分解速率受到显著影响,从而使土壤有机碳空间分布格局随着地形的变化呈现出明显的差异分 布^[3];也有研究发现,土壤自身的理化性质和地表植被分布特征是影响土壤有机碳空间变异的最直接驱动因 素,土壤自身组成和结构上的差异是决定着土壤有机碳的分布特征的最直接原因^[45]。然而,多种因素的运 合作用下,单一因素往往无法较为准确地揭示土壤有机碳变异的本质原因,由于土壤有机碳空间分布特征同 时受到多种因素的共同作用,线性和非线性关系常常同时存在于土壤有机碳与其影响因子之间^[6]。这也为 准确衡量土壤有机碳的空间分布及其影响因素带来更大的难度。

与此同时,目前关于土壤有机碳含量及其影响因素的研究多集中在对表层土壤的研究,而深层土壤有机碳的研究往往受到取样难度较大的影响,不同环境因子与深层土壤有机碳间的相互关系一直少有研究^[7]。 然而,在深层土壤中有机碳的储量十分丰富,Jobbágy^[8]研究指出,20 cm 深度以下的土壤碳储量约占土壤碳库 碳储量的 59%,深层土壤有机碳储量及其垂直分布特征是科学估算评价区域碳汇能力所不可忽略的因素。 随着土壤深度的增加,土壤有机碳含量的垂直分布表现出较为显著的差异,不同深度上影响其垂直分布的主 导因素也表现出较大的空间异质性^[9]。

因此,以内蒙古赤峰市敖汉旗为研究区,逐层分析 0—100 cm 土壤深度内有机碳的空间分布特征,基于广 义相加模型综合分析土壤、植被及地形因素对土壤有机碳含量的影响,旨在探索影响土壤有机碳空间变异的 主要驱动因素,为研究区土地资源的合理利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古赤峰市东南部的敖汉旗(41°42′—42°02′N、119°30′—120°54′E),研究区地势呈现南高 北低的特征,且地形多变,研究区面积约 8300 km²,海拔在 300—1250 m 之间;年降水量在 310—460 mm 之 间,降水自南向北递减;年蒸发量 2000—2600 mm,年平均气温为 6℃,冬季寒冷干燥,夏季温热且降雨集中,属 于温带半干旱大陆性气候。敖汉旗地处欧亚干草原区,地带性植被以疏林草原为主,受区域水热条件和地形 等因素的影响,自然植被分布具有较明显的南北差异,从南到北呈现出由森林和森林草原逐渐向干草原过渡 的规律,同时受生境条件的影响,有沙生植被以及灌丛植被分布^[9]。全旗主要分布有 4 个土类,南部山地主要 为棕壤和褐土,中部黄土丘陵及黄土漫岗主要为栗钙土,北部沙地主要为风沙土,以流动、半流动、固定沙地和 覆沙地为主;敖汉旗土地利用类型多样属于农牧交错地带,是以农为主,农牧林结合的经济类型区。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取

研究于 2014 年 8 月进行野外样品采集,研究采用样线法进行取样,沿研究区东北向西南方向布设 6 条样线,相邻样线间隔 15 km,每条样线上等距离布设 5 km×5 km 的正方形采样区,相邻两样区间隔 13 km。采用人为选择典型样地法,充分考虑每个样区内自然特征,在样区内布设 3—5 个典型样地,共选取 182 个样地(图 1,表 1)。

确定样地后,于每块样地内按"S"形布设4个样点,相邻两样点间隔3—5m,于样点处挖掘标准土壤剖面,按照0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm划分5层,由下至上分层取样,每层取3个重复,按四分法去除多余土样及砾石、植物体等杂质,装入无菌袋带回实验室晾晒、研磨、过筛待测^[9]。

研究采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳含量,土壤容重采用常规的环刀法测定,土壤含水率采用烘箱 105℃烘干至恒重法测定。土壤机械组成采用 Mastersizer3000 激光粒度分析仪测定,按不同土壤粒径划分为 粘粒(<0.002 mm)、粉粒(0.05—0.002 mm)和砂粒(2—0. 05 mm)^[10]。

1.2.2 数据分析方法

广义相加模型是通过联结函数建立响因变量的数学 期望与自变量的一个光滑函数的关系模型^[11]。广义相加 模型最主要的特征是其模型不需要建立自变量与因变量 之间函数假设和具体函数关系,其可以通过自变量和因变 量之间的连接函数构建数学关系。模型能够根据不同的 自变量与因变量间的函数关系,拟合出不同的预测模型, 光滑函数曲线和线性模型能够同时存在于模型中^[12]。其 数学表达式为:

 $g(E(Y)) = \alpha + s_1(X_{1i}) + s_2(X_{2i}) + \cdots + \cdots + s_p(X_{pi})$ (1) 式中,g为链接函数,E(Y)为响应变量的数学期望值, α 为 常数截距项,Sp为解释变量关系的非参数函数,Xpi为预测 变量^[13]。

本研究采用交叉验证法来检验模型拟合精度评价模型的预测能力,交叉验证法通过比较实测值与估计值,综合评价拟合误差,选取平均偏差(MBE)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)来评价模型的拟合精度。

MBE =
$$N^{-1} \sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)$$
 (2)

MAE =
$$N^{-1} \sum_{i=1}^{N} |P_i - O_i|$$
 (3)

RMSE =
$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2}$$
 (4)



式中,N代表观测值的数量,P代表预测值,O代表观测值。模型中 MBE 越接近于 0,表明模型的拟合残差处于稳定分布;MAE 值和 RMSE 值越小分别表明模型在全部范围和局部范围内具有最准确的估计。

应用经典统计学方法对研究区土壤有机碳含量进行统计分析,应用方差分析解释各环境因素对土壤有机碳影响的显著程度。研究中全部的数据分析均在 R 3.0.1 软件下完成^[14]。

		Table 1	The distribution of sample properties in study area							
坡度/(°)	样地数	海拔/m	样地数	土壤类型	样地数	土地利用类型	样地数			
Slope	Number of plots	Elevation	Number of plots	Soil types	Number of plots	Land use types	Number of plots			
<5	81	<500	32	风沙土	45	农地	89			
5—10	37	500—700	43	栗钙土	64	林地	46			
10—15	22	700—900	54	褐土	40	草地	47			
15—20	21	900—1100	38	棕壤	33					
20—25	12	>1100	15							
>25	9									

表1 研究区年采样点属性分布表

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量的描述性统计分析

对研究区 182 个样点的土壤有机碳含量实测数据进行统计分析(表 2),在 0—100 cm 深度的土壤剖面

内,土壤有机碳含量的总体变化范围在 0.23—20.71 g/kg 之间;从垂直分布上看,各土壤深度内有机碳的平均 含量变化范围在 4.47—7.49 g/kg 之间,随着土壤深度的递增有机碳含量逐渐降低,表层土壤(0—20 cm)深度 每下降 20cm,土壤有机碳平均含量分别降低 12.55%、13.74%、7.79%和 14.20%。根据全国第二次土壤普查养 分分级系统,按照 I (> 40 g/kg)、II (30—40 g/kg)、III (20—30 g/kg)、V (10—20 g/kg)、V (6—10 g/kg)、V (< 6 g/kg)将土壤有机质含量划分为 6 个等级^[15]。根据系数换算,土壤有机质(SOM)=土壤有机碳(SOC)× 1.724,研究区土壤有机碳含量总体处在一个较低的水平,40 cm 以上深度内有机碳含量处在 V级,而 40 cm 以下的三层土壤有机碳含量均处在 V级。且又方差分析可知 40 cm 深度以上的土壤有机碳含量显著高于 40 cm 深度以下的其他 3 层土壤有机碳含量(P<0.05),而当土壤深度达到 80 cm 以下时,土壤有机碳含量显著高于 40 cm 深度以下的其他 3 层土壤有机碳含量(P<0.05),而当土壤深度达到 80 cm 以下时,土壤有机碳含量的下降 幅度最大为 14.20%。究其原因,土壤有机碳的最主要补给来自于地表枯落物和动植物残体,表层土壤与外界 的物质交换较深层土壤更为剧烈和频繁,加之在物质和能力的向下传递过程中,深层土壤在层层传递过程中 有机质存留明显被削弱^[16]。各深度土壤有机碳含量的变异系数在 46.02%—54.59%之间,根据 Nielsen^[17]分 级标准,表明各层有机碳的离散程度并未表现出明显差异,且处于中等分散水平。从土壤有机碳分布特征上 看,各层土壤有机碳含量整体均呈现正向右偏态分布特征,其中 0—20、40—60 cm 和 80—100 cm 深度的土壤 有机碳含量近似正态分布,而 20—40、60—80 cm 土壤有机碳偏度值较大,呈现右偏的分布特征。

Table 2 The SOC content in university depuis										
十层深度/cm	土壤有机磷	齿含量 SOC conte	ent∕(g∕kg)	标准美	变异系数/% Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度			
Soil depth	最小值	平均值	最大值	Stand. Dev.			Kurtosis			
	Minimum	Mean	Maximum							
0—20	1.23	7.49a	19.95	3.80	50.73	0.17	2.09			
20—40	0.53	6.55a	20.71	3.20	48.85	1.13	2.58			
40—60	0.57	5.65b	13.83	2.60	46.02	0.30	3.33			
60—80	0.28	5.21bc	13.89	2.71	52.02	1.73	3.51			
80—100	0.23	4.47c	12.40	2.44	54.59	0.19	2.65			

表 2 不同土层深度内土壤有机碳含量 Table 2 The SOC content in different coil doubte

表中标有相同字母的数据之间在 P<0.05 水平下无显著差异

土壤和土地利用方式的差异显著影响着研究区土壤有机碳含量的空间分布,受土地利用方式的影响,土 壤有机碳含量从高到低表现为:林地>农地>草地。其中,40 cm以上深度的土壤范围内,林地内有机碳含量明 显高于农地和草地有机碳含量(P<0.05),其含量约为农地和草地有机碳含量的1.3 倍。当土壤深度达到 60 cm,农地和林地有机碳含量呈现较为显著的降低,这就导致了在40—60 cm 土壤深度时,各土地利用类型下有 机碳含量的差异并不显著。当土壤深度大于 60 cm 时,农地与草地有机碳含量出现显著的降低(P<0.05)。 敖汉旗不同土壤类型下有机碳含量同样呈现出显著的差异,不同土壤类型下土壤有机碳含量有高到低均表现 为:棕壤>褐土>栗钙土>风沙土,其中,60 cm以下土壤深度范围内,棕壤土有机碳含量明显高于其他各土壤, 而风沙土有机碳含量显著低于其他 3 种土壤有机他含量(P<0.05)。特别是在表层(0—20 cm)棕壤土有机碳 含量约为栗钙土与褐土有机碳含量的 1.5 倍,是风沙土的 3 倍。

2.2 广义相加模型的构建

采用广义相加模型拟合不同土壤深度上海拔、坡度、土壤容重、土壤含水率、NDVI以及土壤粘粒含量共6种影响因素与土壤有机碳含量函数关系,其数学表达式为:

 $g(E(Y)) = \alpha + s(海拔) + s(坡度) + s(土壤容重) + s(土壤含水率) + s(土壤粘粒含量) + s(NDVI)$

如表 4 所示,不同土层上的各拟合模型均在 P<0.001 水平下显著,决定系数 R²在 0.54-0.81 之间,表明所 拟合的模型具有较高的精度,且对上层土壤的拟合明显优于下层。从模型的解释率反映出,拟合模型能够较 好地解释各层土壤中有机碳含量的变异情况;0—20cm 深度的土壤有机碳含量解释率最高,为 82.0%,20 cm 以下的各层土壤中,模型对土壤有机碳含量的解释率分别为 79.2%、74.5%、67.1%和 57.2%。

Table 3 Distribution patterns of SOC content in different land use and soil types										
	样地 Sample plot									
土层深度/cm	土地利	川用方式 Land use	e types	土壤类型 Soil types						
Soil depth	林地	农地	草地	棕壤	褐土	栗钙土	风沙土 Aeolian sandy soil			
	Forest land	Farm land	Grassland	Brown earth	Cinnamon soil	Chestnut soil				
0—20	8.84a	6.98b	6.53b	12.84a	8.25b	7.59b	4.88c			
20—40	8.05a	6.64b	5.99b	8.54a	7.39b	7.11b	4.7c			
40—60	5.72a	5.42a	5.31a	7.04a	5.95b	5.86b	4.67c			
60—80	5.43a	4.61b	3.92c	6.96a	5.66b	5.16b	4.57b			
80—100	4.71a	3.74b	2.77c	5.8a	5.41a	4.31b	4.14b			

表 3 不同土壤与土地利用类型下土壤有机碳含量的分布特征

表中同一土壤深度下,不同土地利用方式、土壤类型中标有相同字母的数据之间在 P<0.05 水平下无显著差异

衣 4 个问工块床及的快坐拟旨 参数									
Table 4 The model parameters in different soil depths									
土壤深度/cm Soil depth	估计值 Estimated value	t 值 t value	P值 P value	解释率 Interpretation rate	$R^2(adj)$				
0—20	6.9650	35.70	< 0.001	82.0%	0.811				
20—40	6.3946	29.08	< 0.001	79.2%	0.774				
40—60	5.7897	25.92	< 0.001	74.5%	0.724				
60—80	4.9034	19.03	< 0.001	67.1%	0.619				
80—100	4.8717	21.15	< 0.001	57.2%	0.543				

表 4 不同土壤深度的模型拟合参数

从交叉验证对模型的检验结果分析(表 5),验证结果表明模型拟合的平均偏差为 0,表明各模型拟合的 残差具有较为稳定的分布分布;同时模型拟合的标准误差在 0.1867—0.2576 之间,均方根误差在 1.112—2. 152 之间,平均绝对误差在 1.024—1.987 之间,各误差值均处在一个较低的范围,表明应用广义相加模型可以 较为准确地反映土壤有机碳含量与各影响因子间的相互关系,模型具有较高的拟合精度。

Table 5 The cross-validation test of model in different soil depths									
土壤深度/cm Soil depth	平均偏差 Average deviation	标准误差 Standard deviation	平均绝对误差 Mean absolute deviation	均方根误差 Root mean square error					
0—20	0	0.1867	1.024	1.232					
20—40	0	0.2559	1.098	1.112					
40—60	0	0.2637	1.432	1.561					
60—80	0	0.2576	1.912	2.133					
80—100	0	0.2403	1.987	2.152					

表 5 不同土层上模型的交叉检验

2.3 不同土层有机碳含量的广义相加模型

0—20 cm 深度的模型拟合结果如图 2 所示,除土壤含水率外,土壤容重、坡度、海拔、粘粒含量、NDVI 均与土壤有机碳呈非线性函数关系,土壤容重与 NDVI 对土壤有机碳含量存在显著影响,分别在 P<0.05 和 P<0.001水平下与土壤有机碳含量呈现显著相关关系。当 NDVI<0.2 时,NDVI 与土壤有机碳含量并未表现出明显的相关性,当 NDVI>0.2 后,NDVI 与土壤有机碳含量表现为明显的正相关关系。土壤容重与土壤有机碳含量表现为二次函数关系,土壤有机碳含量与土壤容重整体表现为负相关关系,当土壤容重为 1.68 kg/cm³时,土壤有机碳含量随着容重的增加有所回升。

20—40 cm 深度的模型拟合结果如图 3 所示, 土壤含水率、坡度与土壤有机碳含量呈非线性函数关系, NDVI、土壤粘粒、土壤容重、海拔均与土壤有机碳呈现线性函数关系。海拔和 NDVI 均在 P<0.001 水平下显 著影响着土壤有机碳含量,并表现出极明显的正相关关系; 土壤容重和土壤含水率分别在 P<0.05 和 P<0.1 水



图 3 20—40 cm 深度土壤有机碳含量的广义相加模型 Fig.3 The GAM model for SOC content in 20—40 cm soil depth

平下对土壤有机碳含量有着显著的影响,二者总体均表现为负相关关系。

40—60 cm 深度的模型拟合结果如图 4 所示,NDVI、土壤含水率、海拔与土壤有机碳呈线性相关关系;土 壤容重、土壤粘粒、坡度均与土壤有机碳呈非线性函数关系。坡度与海拔均在 P<0.1 水平下显著影响着土壤 有机碳含量。其中,土壤有机碳含量与海拔表现出明显的正相关关系;坡度与土壤有机碳含量间的关系呈现 多次函数关系,当坡度低于 12°时,土壤有机碳含量整体随着坡度的增加而升高,当坡度大于 12°时,有机碳含 量急速下降,并在坡度>17°后,土壤有机碳含量出现小幅度的回升。

60—80 cm 深度的模型拟合结果如图 5 所示, 土壤有机碳含量在 P<0.05 水平下与土壤含水率呈现的正 相关性, 土壤有机碳含量随着土壤含水率的升高而显著升高。在该深度的土壤深度内, 其他环境因素对土壤 有机碳含量的影响并未表现出显著的统计学意义。

80—100 cm 深度的模型拟合结果如图 6 所示, 土壤含水率和海拔分别在 P<0.001 水平和 P<0.1 水平下

http://www.ecologica.cn



图 4 40—60 cm 深度土壤有机碳含量的广义相加模型 Fig.4 The GAM model for SOC content in 40—60 cm soil depth



图 5 60—80 cm 深度土壤有机碳含量的广义相加模型 Fig.5 The GAM model for SOC content in 60—80 cm soil depth

显著影响着土壤有机碳含量。其中,土壤含水率对土壤有机碳的影响更为显著(P<0.001)的线性正相关性; 当海拔高度<600 m时,土壤有机碳含量与海拔呈现正相关关系,而当海拔继续升高时,土壤有机碳含量与海 拔的相关关系减弱。其他环境因素对土壤有机碳含量的影响并未表现出显著的统计学意义。

3 讨论

研究认为影响土壤有机碳空间变异的主导因素随着土壤深度的变化也相应发生着改变,不同深度的土层 中影响土壤有机碳含量的主要因素也存在较大差异^[18-19]。有研究表明不同深度的土壤对于外界环境温度和 养分的敏感程度存在着较大差异^[20];Liu 等^[21]同样研究发现表层土壤对于气候变化的敏感程度要远远高于 深层土壤。在县域尺度的研究中,气候和温度在研究区内相对均一,在该尺度上的植被、地形以及土壤水分等 因素的差异就形成了影响土壤有机碳的关键因素。





NDVI 和土壤容重在 0—20 cm 深度与土壤有机碳含量呈现出最显著的相关性。NDVI 作为植被生长状态 的重要表征指标,反映了在表层土壤中植被生长与土壤有机碳含量积极的正相关关系,特别是表层土壤枯落 物的积累,是土壤吸收有机质的重要来源[22],而从空间分布格局上看,植被的地带性分布与表层土壤有机碳 含量的空间分布也有着十分紧密的联系^[23],地表植被覆盖和枯落物的积累形成对表层土壤的有效保护,极大 程度地降低了侵蚀对表层土壤的破坏,特别是在 0-20 cm 深度的土壤中得到了更明显的体现。就土壤容重 而言,大量研究表明土壤容重和土壤有机碳含量呈现显著的负相关关系^[24-25]。Qu 等^[26]研究指出,土壤孔隙 作为土壤水分和空气运输的通道,其直接影响着土壤微生物的活动和植被根系的分布,由于,表层土壤容重远 低于深层土壤,其土壤疏松、孔隙丰富,这就为表层土壤的物质交换提供了便利条件和畅通的环境,因此 土壤 有机碳的累积、分解以及转化等过程能够在表层土壤中更加自如地进行。由此可见,表层土壤最直接地参与 外界的物质能量交换,而且其自身同时具备畅通的传递通道,表层土壤的这一自然属性为土壤有机碳的累积 和分解创造了十分良好的基础;这也是在 NDVI 与土壤容重的综合作用的结果,二者共同反映了表层土壤与 外界环境之间的相互联系,工作形成影响表层土壤有机碳累积的主导因素。而在强烈的压实作用影响下,深 层土壤通气性差,相对封闭的环境使得深层土壤感受外界的影响相对滞后,植被对土壤有机碳的补给在土壤 层层传递过程中造成较大的消耗,这就导致了植被与土壤容重对土壤有机碳的影响深层土壤中相对较弱。除 此之外,在表层土壤的大空隙、多植被覆盖的环境下,土壤微生物的数量和种类都远高于深层土壤,对动植物 残体的分解速率较快,更容易形成腐殖质补充土壤有机质含量[27]。表层土壤中充足的物质条件加上良好的 通气环境为微生物的活动提供有利保障。而在相对封闭的深层土壤中,土壤紧实程度高,主要由异氧微生物 为主,内部的环境不适于有机质的合成。

当土壤深度达在 20—60 cm 范围内,海拔和坡度影响土壤有机碳含量的相对重要性开始逐渐提升。 Yeakley 等^[28]的研究指出地形因素(海拔、坡度)是控制土壤水分梯度的关键因子,其主要通过影响土壤侵蚀 强度和局部水热条件等因素改变着有机碳的积累和分解速率。在本研究区 0—100 cm 的各土壤深度内海拔 与土壤有机碳总体成单调递增变化趋势,并形成了相对稳定影响,一方面海拔的升高影响日照强度、降雨和气 温等因素,高海拔地区的降雨量偏高,有利于植物生物量的累积,同时高海拔的低温环境又能抑制土壤微生物 对有机碳的分解,这些都促进了土壤有机碳含量的增加;另一方面,在研究区内海拔的分布与土壤和植被的分 布形成了明显的垂直地带性,敖汉旗内海拔呈现南高北低的分布特征,而随着海拔的变化,土壤和植被的空间 分布差异也十分明显,研究区的土壤类型由南到北依次为棕壤、褐土、栗钙土、风沙土的分布特征,植被由南到 北呈现森林、旱生草本、沙地植被的特征,同时,年降雨量也表现为从南到北递减的分布规律,这些环境要素均 与海拔的南高北低的分布特征存在着较为统一的规律,因此在各种综合作用下,土壤有机碳含量也呈现出南 高北低的分布特征。就研究区坡度而言,呈现北部相对平缓,中南山区较为陡峭总体特征。从植被与土壤的 分布来看,研究区北部为风沙土区,植被盖度极低,恶劣的自然条件对土壤有机碳的积累形成阻碍;而研究区 南部,土壤类型主要是棕壤土,植被茂密,有机碳在这一地区十分丰富。因此,即便研究区南部的陡坡分布较 多,土壤和植被等多因素的综合作用下,坡度与土壤有机碳的含量呈现出不稳定的多次函数关系。

土壤含水率受到土壤深度的明显影响,表层土壤由于长期受到降雨、蒸发、侵蚀等因素的影响,表层土壤 水分含量吸收和蒸散都十分强烈且频繁。这也直接导致了表层的土壤水分和有机碳含量之间很难建立起相 对稳定的关系。Niu^[29]发现土壤表层(0—10 cm)受到土壤侵蚀等外界干扰最明显,由于破面水分冲刷的影 响,土壤养分与水分含量的变化波动较大,因此表层土壤被定义为土壤水分养分的活跃层;次活跃层(20—60 cm)和相对稳定层(100 cm)中土壤水分和土壤养分的相关性较为稳定,深层土壤环境相对封闭,所以土壤深 度到达 60 cm 以下时,土壤水分和土壤有机碳更容易建立起稳定的关系。深层土壤内水分是保障植物根系垂 直延展的重要因素,与植物根系在土壤中的延展长度密切相关。匡文浓等^[30]研究也明确提出土壤有机碳垂 直分布格局主要受到群落优势种根系分布的影响,尤其在根系发达的荒漠植被上表现的更加明显。王凯 等^[31]研究也表明植物根际土有机碳含量明显高于非根际土,根系是深层土壤有机碳含量的主要来自,而深层 土壤中土壤水分含量与植物根系的反馈作用的是影响土壤有机碳累积的关键因子。

4 结论

研究区土壤有机碳含量的变化范围在 0.23—20.71 g/kg 之间,且随着土壤深度的增加有机碳含量逐渐降低。受土地利用方式和土壤类型的影响,各土壤深度土壤有机碳含量有高到低分别表现为:林地>农地>草地,棕壤>褐土>栗钙土>风沙土的分布特征。影响土壤有机碳空间变异的主导因素随着土壤深度的变化而存在明显差异。0—20 cm 深度的土壤中,植被因素和土壤容重的变化是影响土壤有机碳含量最重要的因素;随着土壤深度地增加,在中层土壤中(20—60 cm),地形因素(坡度和海拔)对土壤有机碳含量的累积的影响逐渐增强;在 60—100 cm 深度的土壤中,土壤含水率的变化是影响土壤有机碳含量最重要的因素。

参考文献(References):

- [1] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.
- [2] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils: II. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 1118-1119.
- [3] 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.生态学报,2011,31(6):1604-1616.
- [4] Ruiz-Colmenero M, Bienes R, Eldridge D J, Marques M J. Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. CATENA, 2013, 104: 153-160.
- [5] 李忠佩,林心雄,程励励.施肥条件下瘠薄红壤的物理肥力恢复特征.土壤,2003,35(2):112-117.
- [6] 王玮, 邬建国, 韩兴国. 内蒙古典型草原土壤固碳潜力及其不确定性的估算. 应用生态学报, 2012, 23(1): 29-37.
- [7] 王征,刘国彬,许明祥.黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响.生态学报,2010,30(14):3947-3952.
- [8] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [9] 李龙.赤峰市敖汉旗土壤有机碳时空变异研究.内蒙古农业大学, 2017.
- [10] 张保刚,梁慧春.草地土壤机械组成研究综述.辽宁农业科学,2009,(6):38-41.
- [11] Hastie T J, Tibshirani R J. Generalized Additive Models. London: Chapman & Hall, 1990.
- [12] Barry S C, Welsh A H. Generalized additive modelling and zero inflated count data. Ecological Modelling, 2002, 157(2/3): 179-188.
- [13] Chen Q X, Ibrahim J G. Semiparametric models for missing covariate and response data in regression models. Biometrics, 2006, 62(1): 177-184.
- [14] Gamma Design Software. GS⁺ User's guide Version 7. GeoStatistics for the Environmental Sciences. Plainwell, Michigan: Gamma Design Software, LLC, 2004: 160-160.
- [15] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据. 北京: 中国农业出版社, 1997.

http://www.ecologica.cn

[16]	涩启聰	全新睦	庞貞	王琛	吕锡芩	不同林分	十壤有机碳氮	客度研究	生态环谙学报	2010	19(4).	889-893
101	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	不利玩。	<i>此</i>	1.5/	LI 10/2.	- / Y I H I / V N / I	一上・液(日)ルル水子		二十 かんどい 見 十 112 。	2010.	12(4/	007-075.

- [17] Nielsen D R, Bouma J. Soil Satial Variability. Pudoc: Wageningen, 1985.
- [18] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter-a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. Plant and Soil, 2011, 338(1/2): 143-158.
- [19] Salomé C, Nunan N, Pouteau V, Lerch T Z, Chenu C. Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. Global Change Biology, 2010, 16(1): 416-426.
- [20] Fierer N, Allen A S, Schimel J P, Holden P A. Controls on microbial CO₂ production: a comparison of surface and subsurface soil horizons. Global Change Biology, 2003, 9(9): 1322-1332.
- [21] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(3/4): 184-194.
- [22] Chaplot V, Bouahom B, Valentin C. Soil organic carbon stocks in Laos: spatial variations and controlling factors. Global Change Biology, 2010, 16 (4): 1380-1393.
- [23] Scott N A, Tate K R, Giltrap D J, Smith C T, Wlide H R, Newsome P J F, Davis M R. Monitoring land-use change effects on soil carbon in New Zealand: quantifying baseline soil carbon stocks. Environmental Pollution, 2002, 116(S1): S167-S186.
- [24] Prietzel J, Christophel D. Organic carbon stocks in forest soils of the German Alps. Geoderma, 2014, 221-222: 28-39.
- [25] 祖元刚,李冉,王文杰,苏冬雪,王莹,邱岭.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性.生态学报,2011,31(18): 5207-5216.
- [26] 渠开跃,冯慧敏,代力民,周莉.辽东山区不同林型土壤有机碳剖面分布特征及碳储量研究.土壤通报,2009,40(6):1316-1320.
- [27] 付美云,杨宁,杨满元,林仲桂. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物与养分的耦合关系. 生态环境学报, 2015, 24(1): 41-48.
- [28] Yeakley J A, Swank W T, Swift L W, Hornberger G M, Shugart H H. Soil moisture gradients and controls on a southern Appalachian hillslope from drought through recharge. Hydrology and Earth System Sciences, 1998, 2(1): 41-49.
- [29] 牛海,李和平,赵萌莉,韩雄,董晓红. 毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究. 干旱区资源与环境,2008,22 (2):157-163.
- [30] 匡文浓, 钱建强, 马群, 刘志民. 五种荒漠灌木群落土壤有机碳垂直分布及其与根系分布的关系. 生态学杂志, 2016, 35(2): 275-281.
- [31] 王凯, 宋立宁, 张成龙, 唐达, 吴祥云. 科尔沁沙地典型林分土壤有机碳储量与根际效应的关系. 水土保持学报, 2013, 27(6): 221-225.