

doi: 10.13866/j.azr.2018.03.04

黄土高原南北样带土壤有机碳空间变异及其影响因素^①

任广琦¹, 贾小旭^{2,3}, 贾玉华^{1,2}, 郭成久¹

(1. 沈阳农业大学水利学院 辽宁 沈阳 110000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院 北京 100190)

摘要: 为阐明黄土高原土壤有机碳空间变异特征及影响因素,在南北方向布设一条长 860 km 具有明显环境梯度的样带,采用经典统计学和地统计学方法,分析了 0~500 cm 剖面土壤有机碳的空间分布规律、变异特征及其与环境因子的关系。结果表明:土壤有机碳在水平方向上由南到北逐渐降低,垂直方向上 0~100 cm 随土层逐渐降低,100 cm 以下趋于稳定;0~500 cm 不同土层土壤有机碳均呈中等程度变异,变程 60~270 km;0~40 cm 土壤有机碳空间分布主要受降水和坡度的影响,40 cm 以下主要受土壤质地和气候的影响,表明区域尺度浅层土壤有机碳空间分布取决于气候和地形条件,深层土壤有机碳主要受土壤质地和气候共同影响。

关键词: 黄土高原; 样带; 土壤有机碳; 空间变异; 环境因子

土壤是陆地最大的有机碳库,土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)总储量大约是陆地生态系统植被碳储量的 3 倍,是大气中碳含量的 2 倍⁽¹⁾,对全球碳循环和气候变化具有重要作用。作为陆地生态系统中的重要组成部分, SOC 很大程度上决定着土壤物理、化学及生物学性质,也是控制土壤肥力和生态系统生产力的关键要素⁽²⁻⁴⁾。土地利用⁽⁵⁾、土地管理措施⁽⁶⁾或土壤侵蚀速率⁽⁷⁾等的改变所引起的土壤碳库的轻微变化都会极大地影响大气中二氧化碳浓度进而影响全球气候变化⁽⁸⁻⁹⁾。由于受到气候(如温度和降水)⁽¹⁰⁻¹¹⁾、土壤质地⁽¹²⁻¹³⁾、土壤类型⁽¹⁴⁾、植被类型⁽¹⁵⁻¹⁶⁾、地形条件(如海拔、坡向和坡度)⁽¹⁷⁾以及土地利用类型⁽¹⁸⁾等的影响, SOC 的空间分布在不同尺度上具有高度的异质性⁽¹⁹⁾,这种异质性会影响土壤碳库的估算及土地利用管理。因此,阐明 SOC 的空间分布和变异特征是精确估算区域乃至全球土壤有机碳库的必要条件,对农业管理、土地利用政策调整以及 SOC 模型模拟等具有重要科学意义。

目前,许多研究者在坡面⁽²⁰⁾、流域⁽²¹⁾、区域⁽²²⁾乃至全球⁽²³⁾尺度上对 SOC 的空间变异特征及影响

因素展开了一系列研究,取得重要进展。然而,这些研究大多关注 0~100 cm 土层 SOC 的变化与分布,对 100 cm 以下的深层 SOC 的数量特征和空间变异性的研究较少。黄土高原是我国乃至全球的典型生态脆弱区,该区严重的水土流失和人类长期不合理的土地开垦导致土地退化, SOC 含量在全国范围内水平较低⁽²⁴⁾。为了控制水土流失,改善生态环境,自 20 世纪 50 年代以来,黄土高原开展了一系列的退耕还林(草)工程,植被覆盖率得到显著提高⁽²⁵⁻²⁶⁾, SOC 含量也得到改善。Deng 等⁽⁶⁾研究发现退耕还林(草)工程的实施导致黄土高原 0~20 cm 土层 SOC 增加速率为 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。黄土高原 SOC 空间变异方面已有大量研究⁽²⁷⁻²⁸⁾,但纵观已有研究,对区域深层 SOC 的数量特征和时空分异性的研究较少⁽²⁹⁾。充分认识和把握黄土高原区域尺度 SOC 空间变异特征及其影响机制,有助于准确评估该区土壤碳储量及碳循环过程,并为区域生态修复提供参考。为此,本研究在黄土高原南北方向布设样带,分层测定 0~500 cm 剖面 SOC 含量,分析区域尺度 SOC 的空间变异特征,通过相关分析和逐步回归分析环境因子对不同土层深度 SOC

① 收稿日期: 2017-09-23; 修订日期: 2017-11-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(41501233, 41530854)资助
作者简介: 任广琦(1993-)女,硕士研究生,主要从事土壤性质空间变异研究。E-mail: 2993150328@qq.com
通讯作者: 贾小旭。E-mail: jiaxx@igsnr.ac.cn

的影响,以期为区域 SOC 模拟和管理、生态修复等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于 $33^{\circ}43' \sim 41^{\circ}16'N$, $100^{\circ}54' \sim 114^{\circ}33'E$, 总面积约 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占我国国土面积的 6.7%, 是我国黄河中游陕、甘、宁、晋、豫、青和内蒙古等 7 省区广大地面上厚层黄土沉积的高地, 是世界上最大的黄土堆积区, 约占世界黄土分布的 70%。区内为温带内陆干旱、半干旱气候。年平均降水量为 150 ~ 800 mm, 自西北向东南方向逐渐升高, 其中 55% ~ 78% 的降水集中在每年的 7—9 月, 且多以暴雨形式出现。年平均气温 $3.6 \sim 14.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 由西北部到东南部逐渐升高。区内海拔高度为 100 ~ 3 000 m。地形地貌复杂, 塬、梁、峁及沟谷相间分布。区内主要土壤发育自黄土或黄土状物质, 且不同土壤类型呈地带性分布。植被类型区由东南向西北为森林植被区、森林草原植被区、典型草原植被区、荒漠草原植被区和草原化荒漠植被区。

1.2 实验设计

1.2.1 样带布设 在黄土高原南北方向布设 1 条总长约 860 km 的样带, 具有明显的环境梯度条件。随着纬度的增加, 年平均降水量为 620 ~ 400 mm, 年平均气温为 $12.3 \sim 6.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。土地利用类型依次为农地、林地和草灌地。于 2013 年 4 月, 根据地表景观及地形特征, 每隔 10 km 在样带布设 1 个采样点, 共布设 86 个采样点。Liu 等⁽³⁰⁾ 基于地统计分析发现, 黄土高原区域尺度 0 ~ 40 cm 土层 SOC 变程 340 km。根据变程可制定合理的采样策略, Flatman 等⁽³¹⁾ 建议最佳的采样间距为变程的 1/4 ~ 1/2。因此, 研究黄土高原区域尺度 SOC 的空间变异性, 最低的采样间距应为 85 ~ 170 km。本研究设置样点间距 10 km, 采样密度在其变程范围内, 因此, 样点设置合理, 可用于统计分析。

1.2.2 数据采集 利用 GPS 确定每个采样点的经纬度及海拔 (elevation, E), 利用罗盘测定每个样点的坡度 (slope gradient S_g) 和坡向 (slope aspect S_a), 同时记录各样点的土地利用类型 (land use L_u)。为了定量分析土地利用与 SOC 空间分布的关系, 本文将农地、林地和草地分别赋值 0, 1 和 2⁽³²⁾。利用土钻 (直径 5 cm) 分 11 层 (0 ~ 10, 10 ~ 20, 20 ~ 40,

40 ~ 60, 60 ~ 80, 80 ~ 100, 100 ~ 150, 150 ~ 200, 200 ~ 300, 300 ~ 400, 400 ~ 500 cm) 采集扰动土壤样品。采集 0 ~ 40 cm 扰动土壤样品时, 考虑到样品的地块代表性, 同一地块随机采取 5 个点组成混合土壤样品。将土壤样品带回实验室, 自然风干, 通过 1.0 mm 筛孔, 经预处理后利用激光粒度仪测定不同土层土样的黏粒 (clay, C_y)、砂粒 (sand, S_d) 和粉粒含量 (silt, S_t)。利用高锰酸钾外加热法测定每个样点不同土层的 SOC 含量。利用黄土高原 74 个气象观测站 1951—2012 年的年平均降水量和气温数据, 应用反距离加权插值法将气象要素插值生成空间上连续分布的气候数据 (空间分辨率为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$), 然后提取每个样点的年平均降水量 (mean annual precipitation, MAP)、年平均气温 (mean annual temperature, MAT) 和生长季降水分布 (precipitation seasonal distribution, PSD)。本文利用月降水量的变异系数 (coefficient of variance for the monthly precipitation, Cv_{mp}) 来定量表达 PSD, 即 Cv_{mp} 为 1951—2012 年生长季 (5—9 月) 月均降水量的变异系数。 Cv_{mp} 值愈大, 表明生长季降水愈集中; Cv_{mp} 值愈低, 表明生长季降水分布愈均匀。如果 Cv_{mp} 值为 0, 表示 5—9 月每个月的降水量完全相同。气象数据来源于国家科技基础条件平台——中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。

1.3 统计分析

1.3.1 经典统计学空间变异分析理论 采用经典统计参数如最大值、最小值、均值、方差、偏度和峰度等描述土壤有机碳及相关影响因素的统计分布情况, 变异系数用来表示土壤有机碳整体变异大小。变异系数可根据以下公式计算获得:

$$Cv = (s/\bar{x}) \times 100\%$$

式中: s 为标准偏差; \bar{x} 为变量平均值。变异系数为 $Cv \leq 10\%$ 为弱变异, $10\% < Cv < 100\%$ 为中等强度变异, $Cv > 100\%$ 为强变异⁽³³⁾。

土壤有机碳和相关影响因素之间的相关关系用皮尔逊相关系数表示, 量化土壤有机碳和各影响因素之间的关系采用多元线性回归分析等。

1.3.2 地统计学空间变异分析理论 地统计学进行空间变异分析时要进行半方差⁽³⁴⁾ 的计算。半方差 $\gamma(h)$ 是计算参数在空间位置相隔一定距离下的样本方差值, 因此, 假设当滞后距离为 h 时, 半方差计算公式为:

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

式中: $y(h)$ 为样本的半方差; h 为两个采样点之间的距离, 又称为滞后距离; $N(h)$ 为间隔距离为 h 的样本对数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别为采样点 x_i 和 x_i+h 的测定值。通过实际采样点计算得到的半方差散点图, 需要利用理论半方差模型拟合得到在空间上连续的半方差曲线。这里使用高斯模型、球状模型、指数模型和线性模型等 4 种模型进行拟合, 选出最佳模型⁽³⁵⁻³⁶⁾。

半方差函数有 3 个重要特征值: 块金值(C_0)、基台值(C_0+C)和变程(A)。块金值表示变量随机变异的大小, 基台值表示空间变量间最大变异程度。变程反映的是样本区域的相似性, 该值可用来表征环境因子在多大距离上相关的量度, 变程越大, 变量相互依赖的空间距离越大, 即变异性越小。用空间异质比 $C_0/(C_0+C)$ 描述变量的空间依赖性, 当 $C_0/(C_0+C) < 25%$ 时表示变量有强的空间依赖性, 当 $C_0/(C_0+C)$ 介于 25% ~ 75% 之间时表示变量有中

等程度的空间依赖性, 当 $C_0/(C_0+C) > 75%$ 时表示变量有弱的空间依赖性。

1.4 数据处理

本研究利用 Excel 2016 进行经典统计学分析, 计算不同土层 SOC 的平均值、标准偏差和变异系数。利用 GS + 7.0 软件进行半方差函数模型拟合和交叉验证。利用 SPSS 17.0 进行 Pearson 相关分析和逐步线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 SOC 的水平和垂直分布特征

由图 1 可知, 在水平方向上, 不同土层 SOC 从南到北总体上呈现减小趋势, 这可能与样带降水量和土壤黏粒含量由南到北逐渐降低的变化趋势有关。Jobbagy 和 Jackson⁽²⁵⁾ 的研究结果也表明, 区域尺度 SOC 空间分布与降水量和土壤黏粒含量具有显著正相关关系。

由图 2 可知, 样带不同土地利用方式下 SOC 具

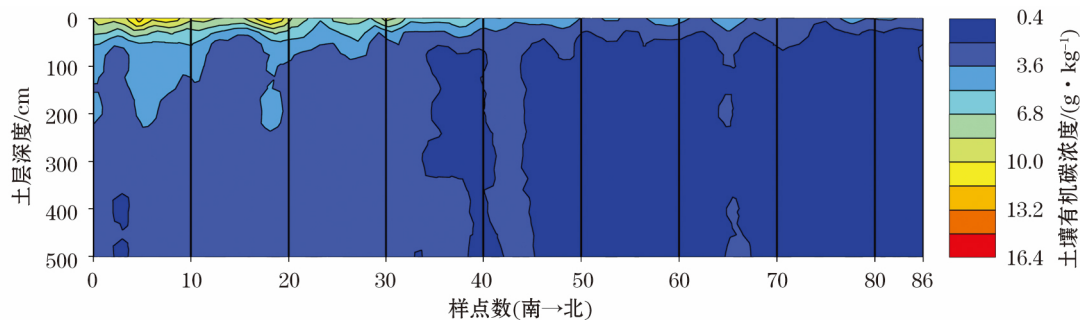


图 1 黄土高原南北样带 0 ~ 500 cm 土层土壤有机碳分布情况

Fig. 1 Distribution of soil organic carbon content in the 0 - 500 cm soil profiles along the south-north transect in the Loess Plateau

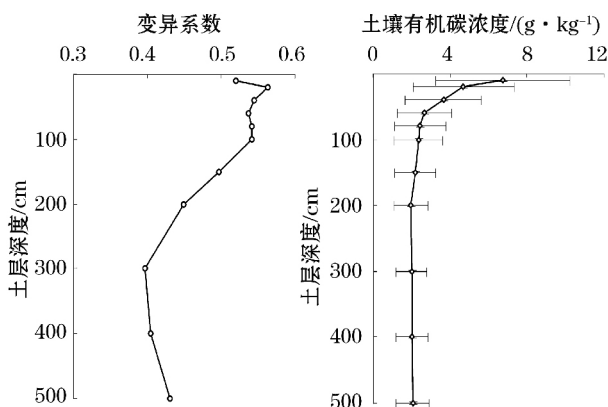


图 2 样带不同土地利用方式下土壤有机碳垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of soil organic carbon content for different land use types along the transect

有显著差异。0 ~ 200 cm 土层 SOC 依次为农地 ($5.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 林地 ($3.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 草地 ($2.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。200 cm 以下土层 3 种土地利用方式 SOC 差异不大。农地主要分布在关中平原地区, 海拔低, 降水量充足, 土壤黏粒含量高, 有机肥的施用以及灌溉等措施可显著增加 SOC 的输入。此外, 土壤黏粒对有机碳的吸附和稳固作用限制了 SOC 的输出⁽³⁷⁾。林地主要分布在样带中部, 降水量适中, 较高的植被生物量可为 SOC 的输入、累积提供更多的有机质; 草地主要分布在样带北部, 属半干旱气候区, 降水量少, 生物量较低, 土壤以含沙量较高的风沙土为主, 不利于 SOC 的输入和累积。此外, 农地地势相对平坦, 林地和草地则位于典型的黄土

丘陵沟壑区,严重的水土流失会导致林草地表层 SOC 的损失。

在垂直方向上 0~100 cm 土层 SOC 随深度逐渐降低,100~500 cm 土层 SOC 总体上趋于稳定(图 1)。样带 0~10 cm 土层 SOC 最高,10~20 cm 次之,平均值分别为 6.72 和 $4.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;100~500 cm 土层 SOC 最低且差异不显著,这可能与表层土壤有机枯落物、作物残茬以及有机肥料的累积有关。黄土高原干旱缺水,降水入渗、枯落物分解及根系分泌物产生的有机碳累积主要发生在表层土壤。100 cm 以下深层 SOC 由于受到较少人类活动、气候和植被生长的影响,基本处于一个较低的稳定状态。农地 0~200 cm 土层 SOC 随深度逐渐降低,200~500 cm 土层 SOC 变化较小;林地和草地 SOC 在 0~100 cm 土层逐渐降低,100 cm 以下趋于稳定。不同土地利用方式下 SOC 垂直分布的差异主要与植被的根系分布、土地的管理制度不同有关。农地有机肥的施用以及灌溉利于表层 SOC 随水分迁移至更深层次土壤中,进而增加深层 SOC 含量⁽³⁸⁾。

2.2 样带不同土层 SOC 空间变异特征

样带 0~500 cm 剖面 Cv 变化范围为 39.6%~56.4%,平均值为 49.3%(图 3)。根据 Nielsen 标准⁽³⁹⁾,黄土高原区域样带 0~500 cm 剖面 SOC 空间

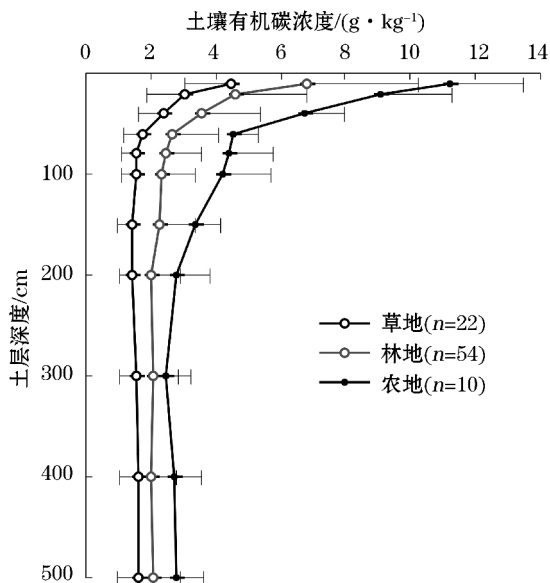


图 3 样带 0~500 cm 土层土壤有机碳及其变异系数的垂直分布

Fig. 3 Vertical distributions of soil organic carbon content and coefficient of variation in the 0-500 cm soil profiles along the transect

分布具有中等程度变异特征,且 20~40 cm 土层

SOC 变异强度最大。

地统计结果表明,0~150 cm 和 150~500 cm SOC 的最佳拟合模型分别为高斯模型和指数模型(表 1)。各土层 SOC 模拟结果中,块金值均较小,变化范围为 0.231~4.67,基台值变化范围为 1.263~29.330,表明随机部分所引起的 SOC 空间变异性较小。SOC 空间异质比变化范围为 0.742~0.852,均属于弱等空间依赖性。样带 0~150 cm 土层 SOC 变程变化范围为 65~113 km,150~500 cm 土层为 273 km。因此,样带 150~500 cm 土层 SOC 的空间连续性优于 0~150 cm 土层,即具有较小的空间变异性,这可能是由于浅层土壤受到降水、植被以及人类活动等的影响较为严重所致。

2.3 土壤有机碳空间分布的影响因素

2.3.1 相关性分析 样带不同土层 SOC 总体上与各环境因子的相关关系表现一致(表 2)。SOC 与降水、气温和黏粒极显著正相关,而与降水季节分布极显著负相关。在干旱半干旱地区,较多的降水能够促进植被生长和凋落物分解,利于 SOC 的输入和累积⁽⁴⁰⁻⁴²⁾。降水和气温还可以通过控制土壤微生物活动,影响 SOC 分解速率⁽⁴³⁻⁴⁴⁾。土壤黏粒含量对土壤团聚体、土壤孔隙度、通气性和导水性的影响会直接影响 SOC 的贮存,其对 SOC 的吸附作用会增加其稳定性,减少由微生物分解而造成的有机碳损失⁽⁴⁵⁻⁴⁶⁾。

SOC 与降水季节分布显著负相关,表明生长季降水分布越均匀,越有利于 SOC 水平的提高。黄土高原地形复杂多变,沟壑纵横,降水集中或暴雨会产生较为严重的土壤侵蚀而使水分损失,不能使有限的降水转化为能被植物吸收利用的土壤水分,不利于植被生长和有机碳的输入。此外,土壤侵蚀会使表层土壤中有机物及富含有机质的团聚体损失,进而削弱 SOC 的累积。

SOC 与海拔极显著负相关,与坡向无显著相关关系;10~150 cm 土层 SOC 与坡度显著负相关,其他土层 SOC 与坡度无显著相关关系,表明坡度因子仅对 150 cm 以内 SOC 有显著影响,对 150 cm 以下 SOC 影响较小。海拔和坡度等地形因素能够影响局地水热平衡以及土壤侵蚀过程,进而作用于 SOC 的输入和输出过程⁽⁴⁷⁻⁴⁸⁾。

2.3.2 逐步线性回归分析 选择与 SOC 显著相关的土地利用、降水、气温、降水季节分布、海拔、坡度

表 1 不同土层土壤有机碳最优变异函数模型相关参数及交叉检验精度评价

Tab.1 Parameters of optimal variation function models for soil organic carbon content in various soil layers and the evaluation on crosscheck accuracy

土层深度 /cm	模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C$)	变程(A) /km	残差平方和(RSS)	决定系数(R^2)	空间异质比($C_0 / (C_0 + C)$)
0 ~ 10	高斯	4.67	29.330	93.254	3.783	0.980	0.841
10 ~ 20	高斯	1.72	11.449	65.627	3.070	0.966	0.850
20 ~ 40	高斯	1.05	7.109	70.789	0.507	0.981	0.852
40 ~ 60	高斯	0.785	3.580	75.275	0.148	0.969	0.781
60 ~ 80	高斯	0.726	3.462	87.486	0.120	0.959	0.790
80 ~ 100	高斯	0.674	3.358	94.847	0.065	0.970	0.799
100 ~ 150	高斯	0.526	3.162	113.120	0.060	0.952	0.834
150 ~ 200	指数	0.318	1.620	273	0.061	0.829	0.804
200 ~ 300	指数	0.231	1.422	273	0.049	0.833	0.838
300 ~ 400	指数	0.306	1.263	273	0.056	0.742	0.758
400 ~ 500	指数	0.373	1.445	273	0.082	0.709	0.742

表 2 不同土层土壤有机碳与环境因子的 Pearson 相关系数

Tab.2 Pearson correlation coefficients between soil organic carbon content and environmental factors

土层深度 /cm	土地利用(L_u)	降水量(MAP)	气温(MAT)	降水季节分布(PSD)	海拔(E)	坡向(S_a)	坡度(S_g)	黏粒(C_v)
0 ~ 10	-0.531 **	0.773 **	0.726 **	-0.743 **	-0.321 **	0.086	-0.181	0.604 **
10 ~ 20	-0.599 **	0.830 **	0.808 **	-0.827 **	-0.502 **	-0.059	-0.298 **	0.698 **
20 ~ 40	-0.586 **	0.837 **	0.815 **	-0.818 **	-0.495 **	-0.089	-0.265 *	0.754 **
40 ~ 60	-0.546 **	0.781 **	0.758 **	-0.740 **	-0.447 **	-0.070	-0.264 *	0.772 **
60 ~ 80	-0.583 **	0.743 **	0.718 **	-0.700 **	-0.459 **	-0.032	-0.333 **	0.708 **
80 ~ 100	-0.560 **	0.725 **	0.720 **	-0.711 **	-0.451 **	-0.111	-0.301 **	0.708 **
100 ~ 150	-0.514 **	0.735 **	0.714 **	-0.705 **	-0.318 **	-0.019	-0.225 *	0.697 **
150 ~ 200	-0.442 **	0.674 **	0.661 **	-0.646 **	-0.248 *	0.032	-0.117	0.712 **
200 ~ 300	-0.372 **	0.677 **	0.658 **	-0.640 **	-0.243 *	0.089	-0.014	0.710 **
300 ~ 400	-0.375 **	0.649 **	0.647 **	-0.625 **	-0.313 **	-0.025	-0.049	0.626 **
400 ~ 500	-0.382 **	0.641 **	0.642 **	-0.625 **	-0.305 **	-0.046	-0.007	0.664 **

注: * 表示在置信度(双侧) 为 0.05 时 相关性为显著; ** 表示在置信度(双侧) 为 0.01 时 相关性为极显著。

表 3 不同土层土壤有机碳逐步线性回归分析

Tab.3 Stepwise linear regression analyses on soil organic carbon content in various soil layers

土层深度 /cm	降水(MAP)	气温(MAT)	降水季节分布(PSD)	坡度(S_g)	黏粒(C_v)	常数项	决定系数(R^2)
0 ~ 10	0.037					-12.313	0.597 **
10 ~ 20	0.015		-0.222	-0.060		6.863	0.731 **
20 ~ 40	0.022			-0.034		-7.457	0.715 **
40 ~ 60	0.009				0.104	-3.424	0.680 **
60 ~ 80	0.009			-0.026	0.073	-3.005	0.645 **
80 ~ 100	0.008				0.085	-2.925	0.608 **
100 ~ 150	0.007				0.068	-2.490	0.592 **
150 ~ 200		0.204			0.082	-1.120	0.579 **
200 ~ 300		0.176			0.078	-0.771	0.568 **
300 ~ 400	0.005				0.047	-1.075	0.489 **
400 ~ 500		0.213			0.070	-1.014	0.518 **

注: ** 表示 $P < 0.01$ 。

和黏粒含量 7 个变量与不同土层 SOC 分别进行逐步线性回归分析,以确定影响区域 SOC 空间分布的关键因子。拟合方程均经过显著性检验,且均在 $P < 0.01$ 水平上显著(表 3)。对于不同土层而言,决定系数 R^2 变化范围为 0.489 ~ 0.731,表明所选变量可以较好地模拟不同土层 SOC,可以解释区域样带不同土层 SOC 空间变异的 48.9% ~ 73.1%。可以看出,浅层 0 ~ 40 cm 土层 SOC 主要受降水和坡度的影响,40 ~ 500 cm 土层 SOC 空间分布主要受降水、气温和黏粒含量的影响,表明浅层 SOC 空间分布受气候和地形因素驱动,而深层 SOC 受气候和土壤因素驱动。因此,气候和地形因素可作为一定置信水平上预测区域浅层 SOC 空间分布状况的预测变量,而气候和土壤因素可作为预测深层 SOC 空间分布的预测变量。

3 结论

(1) 黄土高原 0 ~ 500 cm 土层 SOC 水平方向上由南向北逐渐降低,垂直方向上 0 ~ 100 cm 土层 SOC 随深度逐渐降低,100 cm 以下 SOC 趋于稳定。

(2) 不同土层 SOC 具有明显的空间变异性,变异程度为中等变异。0 ~ 150 cm 土层 SOC 变程 65 ~ 113 km,150 ~ 500 cm 土层 SOC 变程 273 km,且具有弱等程度空间依赖性。

(3) 气候和地形因子是影响样带 0 ~ 40 cm 土层 SOC 空间分布的主要因素,40 ~ 500 cm 土层 SOC 主要受土壤质地和气候的共同影响。

参考文献(References):

- Elderfield H. Biogeochemistry: An analysis of global change (J). *Geological Magazine*, 1993, 130(1): 137 - 138.
- Tiessen H, Cuevas E, Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility (J). *Nature*, 1994, 9: 23 - 26.
- LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security (J). *Science*, 2004, 304: 1 623 - 1 627.
- Peter Warneck, William H. Schlesinger, biogeochemistry, an analysis of global change (J). *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1998, 31(3): 347 - 348.
- Munoz-Rojas M, Jordana Zavala L M, et al. Modelling soil organic carbon stocks in global scenarios: A CarboSOIL application (J). *Biogeosciences*, 2013, 10: 8 253 - 8 268.
- Deng L, Shanguan Z P, Sweeney S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China (J). *Scientific Reports*, 2014, 4: 7 039 - 7 046.
- Desjardins R, Smith W, Grant B, et al. Management strategies to sequester carbon in agricultural soils and to mitigate greenhouse gas emissions (J). *Climatic Change*, 2005, 70: 283 - 297.
- Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security (J). *Science*, 2004a, 304: 1 623 - 1 627.
- Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change (J). *Geoderma*, 2004b, 123: 1 - 22.
- Dai W, Huang Y. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of Chian (J). *Nature*, 2006, 440: 165 - 173.
- Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change (J). *Nature*, 2006, 65: 87 - 94.
- Hassink J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity (J). *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 487 - 491.
- Hevia G G, Buschiazzo D E, Heppera E N. Organic matter in size fractions of soils of the semiaide Argentina: Effects of climate, soil texture and management (J). *Geoderma*, 2003, 116: 265 - 277.
- 黎英华, 姚云峰, 秦富仓, 等. 不同类型土壤的有机碳密度特征 (J). *干旱区研究*, 2016, 33(3): 455 - 460. (Li Yinghua, Yao Yunfeng, Qin Fucang, et al. Study on the characteristics of the density of organic carbon in arid area of different soil types (J). *Arid Zone Research*, 2016, 33(3): 455 - 460.)
- Su Z Y, Xiong Y M, Zhu J Y. Soil organic carbon content and distribution in a small landscape of Dongguan, South China (J). *Pedosphere*, 2006, 16: 10 - 17.
- 王鑫, 杨德刚, 熊黑钢, 等. 新疆不同植被类型土壤有机碳特征 (J). *干旱区研究*, 2017, 34(4): 782 - 788. (Wang Xin, Yang Degang, Xiong Heigang, et al. Xinjiang soil characteristics of organic carbon (J). *Arid Zone Research*, 2017, 34(4): 782 - 788.)
- Leifeil J, Bassin S, Fuhrer J. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude (J). *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 105: 255 - 266.
- Wang Y Q, Zhang X C, Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China (J). *Geoderma*, 2009, 150: 141 - 149.
- Chang R, Fu B, Liu G, et al. The effects of a forestation on soil organic and inorganic carbon: A case study of Loess Plateau of China (J). *Catena*, 2012, 95(3): 145 - 152.
- 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性及其尺度效应 (J). *土壤学报*, 2008, 45(3): 544 - 549. (Zhang Jiguang, Chen Hongsong, Su Yirong, et al. Spatial heterogeneity and scale effect of surface soil moisture in Karst depression (J). *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 45(3): 544 - 549.)
- 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 小流域土壤有机碳密度空间变异特征的尺度效应研究 (J). *土壤*, 2014, 46(5): 787 - 792. (Li Long, Yao Yunfeng, Qin Fucang, et al. Scale effect of spatial variability of soil organic carbon density in small watershed (J). *Soil*, 2014, 46(5): 787 - 792.)
- 姜春, 吴志峰, 钱乐祥, 等. 广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应 (J). *生态学报*, 2013, 33(16): 5 118 - 5 125. (Jiang Chun, Wu Zhifeng, Qian Lexiang, et al. Scale effect of spatial variability of soil organic carbon in Guangdong mountain area (J). *Journal of Ecology*, 2013, 33(16): 5 118 - 5 125.)
- Kramarenko S S, Dovgal I V. Spatial variation of the land snail

- brephulopsis Cylindrica (Gastropoda, Pulmonata, Enidae): A fractal approach (J). *Vestnik Zoologii* 2014, 48(5): 433–440.
- (24) 唐克丽. 水土保持中国 (M). 北京: 科学出版社, 2004. (Tang Keli. Soil and Water Conservation in China (M). Beijing: Science Press, 2004.)
- (25) Jobbagy Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation (J). *Ecological Applications* 2000, 10: 423–436.
- (26) Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region (J). *China, Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142: 184–194.
- (27) 刘宪锋, 杨勇, 任志远, 等. 2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度时空变化 (J). *中国沙漠* 2013, 33(4): 1 244–1 249. (Liu Xianfeng, Yang Yong, Ren Zhiyuan, et al. Spatial and temporal variations of vegetation coverage in the Loess Plateau from 2000 to 2009 (J). *Journal of Desert Research*, 2013, 33(4): 1 244–1 249.)
- (28) 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. (Jia Yuping, Su Zhizhu, Duan Jiannan. Spatial variability of soil organic carbon in small watershed of gully region of Loess Plateau (J). *Journal of Soil and Water Conservation* 2004, 18(1): 31–34.)
- (29) Shi S, Zhang W, Zhang P, et al. A synthesis of change in deep soil organic carbon stores with afforestation of agricultural soils (J). *Forest Ecology and Management* 2013, 296: 53–63.
- (30) Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Large-scale spatial variability and distribution of soil organic carbon across the entire Loess Plateau (J). *Soil Research* 2012, 50: 114–124.
- (31) Flatman Stephen, Alam Intiaz, Gerard Jeffery, et al. Process analytics for purification of monoclonal antibodies (J). *Journal of Chromatography* 2006, 848(1): 79–87.
- (32) 张帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响 (J). *环境科学学报* 2014(12): 3 094–3 101. (Zhang Shuai, Xu Mingxiang, Zhang Yafeng, et al. Effects of land use change on soil organic carbon storage in the Loess Hilly Region (J). *Journal of Environmental Science* 2014(12): 3 094–3 101.)
- (33) Dempster D N, Jones D L, Murphy D V. Organic nitrogen mineralisation in two contrasting agro-ecosystems is unchanged by biochar addition (J). *Soil Biology and Biochemistry* 2012, 48(4): 47–50.
- (34) Yost R S, Uehara G, Fox R L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large areas I. Semi-variograms (J). *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46: 1 028–1 032.
- (35) 张仁铎. 空间变异理论及应用 (M). 北京: 科学出版社, 2005. (Zhang Renduo. Theory and Application of Spatial Variation (M). Beijing: Science Press, 2005.)
- (36) 李猛, 段文标, 陈立新, 等. 红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析 (J). *生态学报* 2012, 32(5): 1 396–1 402. (Li Meng, Duan Wenbiao, Chen Lixin, et al. Analysis of Korean pine broad-leaved forest gap soil water distribution pattern of geostatistics (J). *Journal of Ecology*, 2012, 32(5): 1 396–1 402.)
- (37) Paul E A. Dynamics of soil organic matter (J). *Plant and Soil*, 1984, 76: 275–285.
- (38) Zhang C, Liu G B, Xue S, et al. Soil carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau (J). *European Journal of Soil Biology* 2013, 54: 16–24.
- (39) Han Yuelin, Sun Xianting, Wang Xiaoxiao, et al. A type of new conserved quantity deduced from Mei symmetry for Nielsen equations in a holonomic system with unilateral constraints (J). *Chinese Physics B* 2012, 12: 11–15.
- (40) Lal R, Follett R F, Stewart B A, et al. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security (J). *Soil Science* 2007, 172(12): 943–956.
- (41) Hassink J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity (J). *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 487–491.
- (42) Wang J, Fu B J, Qiu Y. Analysis on soil nutrient characteristics for sustainable land use in Danangou catchment of the Loess Plateau, China (J). *Catena* 2003, 54: 17–29.
- (43) 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化 (J). *气候变化研究进展* 2008, 4(5): 282–289. (Pan Genxing. Chinese soil organic carbon pool and its evolution and response to climate change (J). *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5): 282–289.)
- (44) 郭广芬, 张称意, 徐影. 气候变化对陆地生态系统土壤有机碳储量变化的影响 (J). *生态学杂志* 2006, 25(4): 435–442. (Guo Guangfen, Zhang Chengyi, Xu Ying. The impact of climate change on soil organic carbon storage in terrestrial ecosystem (J). *Chinese Journal of Ecology* 2006, 25(4): 435–442.)
- (45) Hassink J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity (J). *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 487–491.
- (46) Saxon K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions (J). *Soil Science Society of America Journal* 2006, 70: 1 569–1 578.
- (47) 魏孝荣, 邵明安, 高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系 (J). *环境科学* 2008, 29(10): 2 879–2 884. (Wei Xiaorong, Shao Ming'an, Gao Jianlun. Small watershed in gully region of Loess Plateau soil organic carbon and environmental factors in the relationship between (J). *Environmental Science* 2008, 29(10): 2 879–2 884.)
- (48) Leifeld J, Bassin, Fuhrer J. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude (J). *Agriculture Ecosystems and Environment* 2005, 105: 255–266.

Spatial Variation of Soil Organic Carbon Content and Its Driving Factors along South-North Transect in the Loess Plateau of China

REN Guang-qi¹, JIA Xiao-xu^{2,3}, JIA Yu-hua^{1,2}, GUO Cheng-jiu¹

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110000, Liaoning, China;

2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. College of Resources and Environment Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The China's Loess Plateau is characterized by severe water shortage, thick loess deposits and intensive soil erosion, and it is a typical ecological fragile region in China and even around the world. Serious soil erosion and long-term irrational land reclamation in this region leads to a decline of soil organic carbon content (SOC). As an important component in the terrestrial ecosystem, the SOC which is closely related to soil physical, chemical and biological properties is a key factor affecting soil fertility and productivity of ecosystem. Slight fluctuation of soil organic carbon pool, which is caused by the changes of land use, land management measures or soil erosion rate, affects strongly the carbon dioxide in atmosphere and thus the global climate change. The spatial distribution of SOC has generally a high heterogeneity due to the influence of climate (i. e. temperature and precipitation), soil texture, soil type, vegetation type, terrain conditions (such as elevation, slope aspect and slope gradient) and land use type. However, the SOC was focused on mainly on the small spatial scales (generally $< 2 \text{ km}^2$) in previous studies, which is insufficient for understanding the spatial characteristics of SOC on regional and/or global scale. Besides, the available researches overlooked the amount and spatial pattern of SOC in deeper soil layers (deeper than 1 m), which failed to provide a reliable evidence for precise regional soil carbon stock evaluation. In this study, an 860 - km south-north transect was designed, and the values of SOC at 500 cm depth were measured at an interval of 10 km ($n = 86$) along the transect. Thus, the objectives of the study were to investigate the spatial variation of SOC on regional scale and to derive the primary factors dominating the spatial distribution of SOC in different soil layers by using the classical statistics and geostatistics. The results showed that the mean SOC of the 0 - 500 cm soil profile decreased generally from the south to the north of the plateau along the horizontal direction. Along the vertical direction, SOC decreased gradually with the increase of soil depth above 100 cm soil layer, while it tended to be stable in the 100 - 500 cm layer. Under different land use types, SOC was generally in an order of cropland ($5.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > forestland ($3.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > grassland ($2.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). A moderate variation of SOC occurred in various soil layers along a 0 - 500 cm profile, and the best fitting semivariogram models for SOC in the 0 - 150 cm and 150 - 500 cm soil layers were Gaussian and Exponential. The controlling factors of SOC were different from different soil layers: SOC in the top 40 cm soil layer was mainly influenced by mean annual precipitation and slope gradient, while that in the 40 - 500 cm soil layer was controlled by soil texture, mean annual precipitation and temperature. Results suggested that the regional distribution of SOC in shallow soil layers (< 40 cm in depth) was determined by climate and topographic conditions, while that in deep soil layers (40 - 500 cm in depth) tended to be determined by soil texture and climate. The results could provide a scientific basis for ecological regeneration and regional soil carbon stock evaluation.

Key words: Loess Plateau; transect; soil organic carbon content; spatial variation; environmental factor