

祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素^①

杨敏^{1,2}, 杨飞^{1,2}, 杨仁敏^{1,2}, 杨帆^{1,2}, 张甘霖^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以 2012—2013 年调查的我国西北祁连山中段 97 个代表性土壤剖面为对象, 分析了土壤有机碳(SOC)含量的剖面垂直分布模式, 计算了 1 m 土体内各层次 SOC 相对含量及其与环境因素(年均降水、年均温度、海拔、坡度、坡向、NDVI)和土壤因素(颗粒组成、体积质量)之间的关系。结果表明: SOC 含量剖面垂直分布模式可分为均一分布型、表层聚集型、普通递减型、不规则分布型 4 个类型, SOC 含量剖面垂直分布模式与选取的环境因素和土壤颗粒组成之间没有明显的关系; SOC 含量的变异较大, 随着深度的增加从中度变异过渡到强度变异; NDVI 和年均降水是影响表层土体 SOC 含量的主要因子, 而黏粒和砂粒是影响下层土体 SOC 含量的主要因子。

关键词:土壤有机碳; 剖面垂直分布; 有机碳密度; 影响因子; 祁连山

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A

高山生态系统因其丰富的有机碳储量以及对气候变化的敏感性成为近年来全球有机碳研究的热点区域^[1-3]。研究高山生态系统中土壤有机碳(SOC)含量及其影响因素有助于更好地评价其在全球陆地碳循环中的作用及其对气候变化的响应与反馈^[4]。同时, SOC 还是维持高山生态系统生态服务功能的关键要素环, 对于土壤生态、水文过程及功能演变具有重要意义^[5]。

不同区域或不同尺度影响 SOC 含量的因素可能不同。就影响 SOC 含量空间水平分布的因素来看, 已有研究表明, 较小尺度的平原地区由于气候条件趋于一致, SOC 含量空间变异性较低, 影响 SOC 含量的主要因子是土地利用方式、耕作方式和土壤颗粒组成或质地^[6-7]; 而在复杂的山区, 即使较小的空间范围也可能存在很大的变异, 地形和气候对 SOC 含量的空间分布起到关键作用^[8-9]。深层 SOC 含量可能会占有相当大的比例, 是研究土壤碳储量、碳循环不可忽视的一部分^[4]。但就 SOC 含量剖面垂直分布来看, 已有研究主要集中在不同植被类型 SOC 在剖面中的分布差异比较^[4, 10], 对于其具体的分布模式甚少报道, 一般仅是认为由地表至下 SOC 含量呈减少的趋势。而有研究已指出仅利用表层 SOC 含量来推算 1 m 土体 SOC 含量不一定可靠^[11]。因此了解 SOC 含量剖

面垂直分布模式是必要的。就影响 SOC 含量的因子而言, 研究表明环境要素往往是影响表层 SOC 含量的主要因子, 而土壤要素如颗粒组成对深层 SOC 含量则有更大的影响^[11-12]。

虽然有关祁连山 SOC 含量及其影响因子的研究报道已较多^[13-16], 但依据多个代表性剖面研究 SOC 剖面垂直分布模式及各层次 SOC 相对含量与环境因素和土壤因素之间的定量关系的报道不多。为此, 本文以 2012—2013 年调查的我国西北祁连山中段 97 个代表性土壤剖面为对象, 旨在摸清 SOC 含量的剖面垂直分布模式和 1 m 土体内各层次 SOC 相对含量与环境因素(年均降水、年均温度、海拔、坡度、坡向、NDVI)和土壤因素(颗粒组成、体积质量)之间的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山中段位于青藏高原北缘, 地理位置大致为 99°50'09"~99°53'52"E, 38°12'19"~38°16'12"N, 处于青藏、蒙新、黄土三大高原交汇地带, 属高寒干旱—半干旱气候, 是西北内陆干旱区重要水源涵养地。该地区整体地势大致呈西高东低, 平均海拔介于 3 000~4 500 m, 年平均气温为 -0.6~2.0℃, 年平均降雨量

基金项目: 国家自然科学基金项目(41130530)资助。

* 通讯作者(glzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 杨敏(1989—), 女, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要从事土壤地理与发生研究。E-mail: myang@issas.ac.cn

为 435.5 mm, 年均相对湿度为 60%, 气候、地形地貌、成土母质复杂多样, 水热条件和景观水平垂直分异强烈^[17-19]。自然植被由山前平原的草原化荒漠, 随海拔升高呈干草原、森林草原、灌丛草甸、高寒荒漠和永久寒冻带演替; 成土母质主要是黄土及其混有黄土的冰碛物、残积-坡积物和洪积物等; 土壤类型以寒冻雏形土为主, 其他土壤类型包括干润均腐土、正常干旱土和正常有机土^[20]。

1.2 代表性土壤剖面点布设、土样采集与测定

在综合分析地形地貌、水热条件、母质类型等空

间分布特征的基础上, 基于土壤-景观模型为基础的目性采样设计, 在祁连山中段布设了 97 个代表性土壤剖面点(图 1)。分别于 2012 年和 2013 年 7—8 月进行野外调查采样, 对每个代表性土壤剖面点, 按照土壤发生层进行了分层采样。

土壤体积质量测定采用环刀法, 颗粒组成(USDA 制, 黏粒<0.002 mm, 粉粒 0.05~0.002 mm, 砂粒 2~0.05 mm)测定采用激光粒度仪法(BECKMAN COULTER LS230), SOC 含量的测定采用重铬酸钾容量法, 具体的测定方法详见文献[21]。

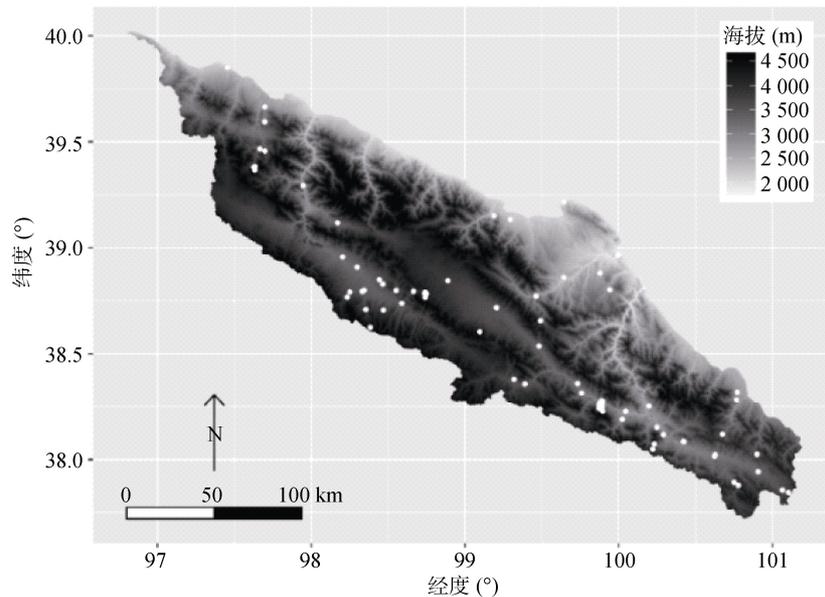


图 1 祁连山区样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Central Qilian Mountains

1.3 环境因子信息提取

代表性土壤剖面样点的经纬度和海拔由手持式 GPS 野外测定获取。气候因子信息(年均气温、年均降水)源于 1 000 m 分辨率的全国气象数据(<http://www.cams.cma.gov.cn>) 栅格化插值。植被归一化指数(normalized difference vegetation index, NDVI), 用于反映植物的长势, NDVI 数据的获取依靠寒区旱区科学数据中心(黑河计划数据管理中心, 2011), 数据集从 30 m 分辨率 LandSat TM5 影像提取(时间在 2010 年 7—9 月, 共 21 景, 数据最大云量不超过 10%)。坡度、坡向信息来自 90 m 分辨率 STRMDEM 数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>)。

1.4 有机碳指标

由于实际采样不同剖面划分的层次数和各层次的深度不尽统一, 研究中将所有土壤剖面的层次划分统一为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 共 5 个层次, 并对 SOC 含量进行了对应的转化处理,

计算公式为:

$$\text{SOC}_{s-e} = \sum_{i=1}^n \text{SOC}_i \times H_i \quad (1)$$

式中 SOC_{s-e} 代表土壤一定深度间隔的 SOC 含量 $s-e$ 代表特定土层, 其中 s 代表土层起始深度, e 代表终止深度, n 为特定土层厚度的原土壤发生层数目, SOC_i 为 i 层 SOC 含量, H_i 代表土层 i 的厚度所占特定土层厚度的比例。

SOC 密度指单位面积一定深度土层中的 SOC 储量, 以 kg/m^2 表示。某一土层 i 中有机碳密度 SOCD (kg/m^2) 的计算公式^[22]为:

$$\text{SOCD} = \sum_{i=1}^n [(1-\theta_i) \times \rho_i \times C_i \times T_i / 100] \quad (2)$$

式中, n 指土层数, θ_i 为第 i 层 >2 mm 砾石含量的体积百分比(%), ρ_i 为第 i 层土壤体积质量(g/cm^3), C_i 为第 i 层 SOC 含量(g/kg), T_i 是指第 i 土层的厚度(cm), 100 为单位换算系数。

SOC 的相对含量(C_p)^[10, 23]定义为特定土层中

SOC 的含量 (SOC_{s-e}) 占整个剖面中 SOC 总量(SOC_T) 的比例, 计算公式为:

$$C_p = \frac{SOC_{s-e}}{SOC_T} \quad (3)$$

1.5 数据统计分析

SOC 含量剖面垂直分布模式制图采用 Microsoft Excel 2013 进行, 数据统计分析采用 R 软件, 环境因子和土壤颗粒组成对 SOC 含量影响的分析采用随机森林法, 这是因为该方法在处理多元非线性数据等方面, 相比较于其他的基于多元统计的预测方法, 随机森林法具有防止过拟合、模型的稳定性强以及易于处理非线性回归等优势^[23]。

2 结果与分析

2.1 有机碳含量在剖面中的分布特征

祁连山区 97 个土壤剖面不同层次 SOC 含量和密度分布特征见表 1。祁连山区 SOC 含量和密度总体水平较高, 表层(0~20 cm)SOC 的平均含量为 42.6 g/kg, 显著高于我国西北地区表层 SOC 平均含量(18.4 g/kg) 和全国平均含量(18.6 g/kg)^[24]。SOC 含量和密度均呈现随表层往下逐渐减小的趋势。SOC 含量表层变异

系数为 0.83, 属中度变异强度, 表层以下各层均为强变异, 且随深度增加变异系数增大。SOC 密度在剖面中的分布特点也表现出同样的趋势, 但各土层 SOC 密度的变异性小于其含量的变异性, 这可能是由于有机碳的积累可以提高土壤的孔隙度, 降低土壤体积分质量。

整体表层 SOC 含量普遍高于下层, SOC 平均含量随着土壤深度的增加而逐渐降低, 但是 SOC 含量的最大值是出现在 20~40 cm 和 40~60 cm 两个层次, 均高于表层 0~20 cm, 这不同于表层高于下层的普遍现象, 造成这一“异常”的主要原因是调查的土壤剖面中有有机土和均腐土, 有机土特征之一就是往往会有较多的半腐有机物质在表下层积累, 而均腐土的 SOC 含量往往是由上至下呈逐渐减少趋势^[25]。

2.2 不同土层有机碳相对含量分布特征

表 2 为计算出不同土层 SOC 相对含量(C_p), 可以看出, 表层 (0~20 cm) 的 C_p 最高, 平均为 0.38, 表现出显著的表聚特征。随着土壤深度的增加, C_p 减小, 但变异系数增大。表层 C_p 在剖面中的最大值为 0.93, 这是因为在高海拔山区, 植物根系一般集中在表层以及土体一般较浅 (30 cm 左右) 所致。

表 1 不同土层土壤有机碳含量及密度特征
Table 1 Characteristics of SOC contents and SOC densities at different normalized depths

指标	土层 (cm)	样点个数	最小值	最大值	中值	均值	标准差	变异系数
SOC (g/kg)	0~20	97	2.56	153.97	31.95	42.60	35.24	0.83
	20~40	96	1.44	172.68	18.06	27.81	30.22	1.09
	40~60	83	1.30	180.35	9.57	22.23	29.80	1.34
	60~80	70	0.96	136.65	7.64	17.26	24.73	1.43
	80~100	64	0.96	127.32	5.52	15.33	24.86	1.62
SOCD (kg/m ³)	0~20	97	0.25	23.99	3.71	6.08	4.25	0.70
	20~40	96	0.06	19.14	3.37	4.28	3.98	0.93
	40~60	83	0.10	15.38	2.28	3.18	3.62	1.14
	60~80	70	0.08	11.48	1.83	2.38	2.91	1.22
	80~100	64	0.06	12.42	1.22	1.98	2.90	1.46

表 2 不同土层土壤有机碳相对含量
Table 2 SOC relative contents at different normalized depths

土层(cm)	样点个数	最小值	最大值	中值	均值	标准差	变异系数
0~20	97	0.09	0.93	0.41	0.38	0.13	0.33
20~40	96	0.07	0.50	0.25	0.23	0.06	0.24
40~60	83	0.04	0.39	0.17	0.17	0.06	0.37
60~80	70	0.02	0.23	0.12	0.12	0.05	0.39
80~100	64	0.02	0.27	0.10	0.10	0.06	0.54

2.3 有机碳剖面垂直分布模式

基于 C_p 对 63 个垂直深度达到 1 m 或 1 m 以上

的剖面点 SOC 含量随深度变化的趋势观察分析表明, 祁连山中段 SOC 含量剖面垂直分布模式主要可

以划分为 4 种 (图 2)：普通递减型(由上至下逐步减少)；表层聚集型 (表层最高，向下骤减)；均一分布型(上下相差较小)；不规则分布型 (由上至下变化没有规律,图 2 中不规则分布型分布模式图选取了其中一个剖面作为代表)。其中，普通递减型为主要垂直分布模式，有 37 个剖面点 (占 58.7%) 属于这一分布模式；其次是表层聚集型 (13 个剖面点，占 20.6%) 和均一分布型 (8 个剖面点，占 12.7%)；不规则分布型最少 (5 个剖面点，占 7.9%)。

在表层聚集型模式中，SOC 积聚在表层，其

C_p 约为 0.55，显著高于下层；在剖面深度(40 ~ 100 cm)范围内，C_p 随剖面深度的增加缓慢降低，表明在该模式下，土壤 SOC 含量在 40 cm 往下趋于稳定状态。在均一分布型模式中，C_p 随土壤深度增加而围绕 0.2 轻微浮动，变幅小于 10%。在不规则分布型模式中的 5 个剖面点中，每个剖面的 C_p 不尽相同，很难归纳出一个总体变化特征。在普通递减型模式中，表层 C_p 最高，随着剖面深度的增加而逐渐递减，其 C_p 介于均一分布型和表层聚集型之间。

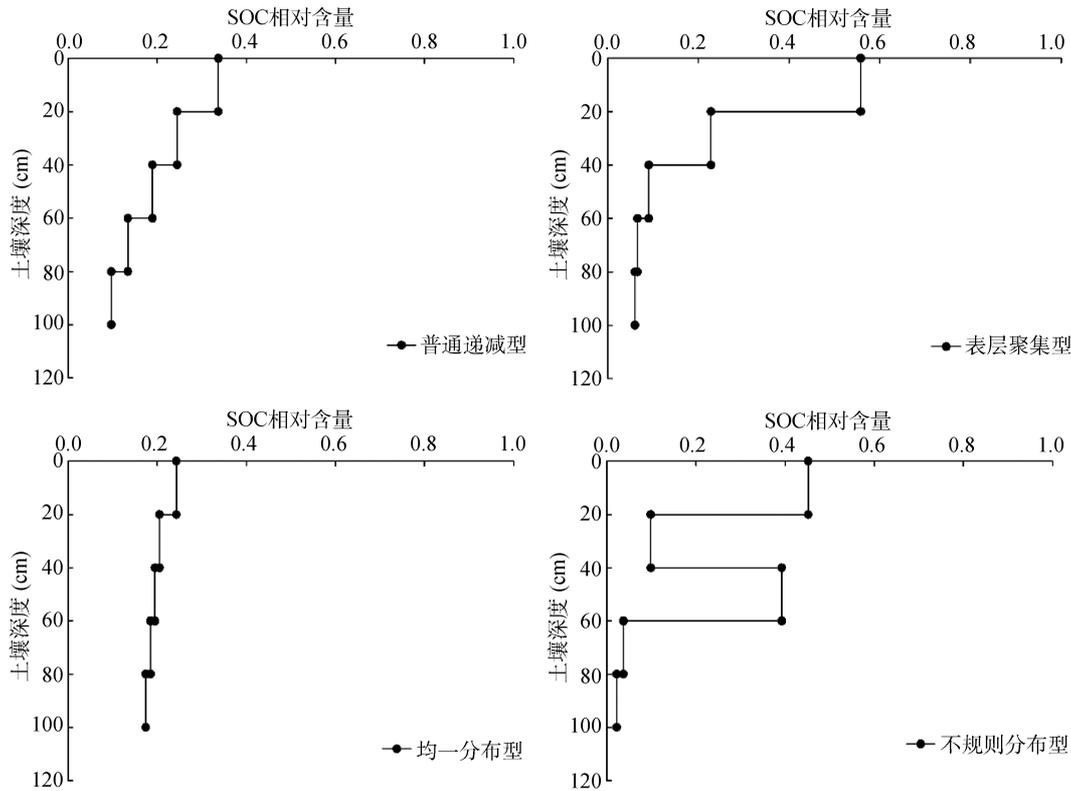


图 2 祁连山中段有机碳剖面垂直分布模式

Fig. 2 Profile vertical distribution modes of SOC in Central Qilian Mountains

通过对不同垂直分布模式所含典型剖面的环境因子统计分析，结果如表 3 所示。其中，均一分布型模式 (有机土、部分均腐土) 主要分布在祁连山中段 2 500 m 左右的较低海拔区和 3 700 m 以上的高海拔范围内的阴坡，较其他分布模式，其植被覆盖度处在一个较低的水平。表层聚集型模式主要分布在山区中

部位置，降水量较丰富，植被覆盖度较高，草根在土壤表层的盘结，促进了表层 SOC 的积累。普通递减型模式 (寒冻锥形土和干旱土为主，部分均腐土) 作为祁连山区土壤最主要的垂直分布模式，均匀分布于整个研究区域内。不规则分布型模式 (寒冻锥形土) 形成原因与剖面点位置微环境相关，如有的底层 SOC

表 3 有机碳不同剖面垂直分布模式的环境因子统计特征

Table 3 Statistics of environmental factors and soil particle compositions under different SOC profile vertical distribution modes

分布模式	海拔(m)	坡度(°)	坡向	年降水(mm)	年均温(°C)	NDVI
均一分布型	2 384 ± 280、3 993 ± 284	13.5 ± 6.9	阴坡	276 ± 94	-2.8 ± 4.5	0.24 ± 0.2
表层聚集型	3 479 ± 284	9 ± 7	阴坡	306 ± 47	-2.6 ± 1.5	0.43 ± 0.17
普通递减型	3 097 ± 414	11 ± 7	阴、阳坡	276 ± 68	-0.4 ± 2.3	0.39 ± 0.22

含量增加是因为该层紧邻下部的永冻层,低温使得该层腐殖质分解缓慢;有的剖面某一中间层次是 SOC 埋藏表层,因此 SOC 含量较上下相邻土层高。

2.4 有机碳含量和密度的影响因素分析

基于随机森林法分析了体积质量、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、海拔、坡度、坡向、年降水、年均温、植被归一化指数(NDVI)共 10 项环境和土壤因子对 SOC 含量和密度的影响。如表 4 所示,模型对表层 SOC 含量和密度的解释能力最高,为 68% 和 52%,随着土壤深度的加深,模型的解释能力有所降低。对 SOC 含量及密度预测能力最差均出现在 60 ~ 80 cm 土层,分别为 45% 和 23%。对 SOC 密度的预测能力低于 SOC 含量,可能是由于 SOC 和体积质量的决定关系并不是简单的线性关系。

不同因子对 SOC 含量和密度影响的相对重要性

如图 3 所示。其中,土壤因素(体积质量、黏粒、粉粒、砂粒)和环境因素中的 NDVI 和年均降水对各土层 SOC 含量和密度的影响较为显著。对于表层土壤而言,NDVI 是对 SOC 含量和密度影响最大的因素,相对重要性分别为 18.7% 和 20.4%;而对于表下层土壤,体积质量是 SOC 含量和密度最重要的单一影响因子(除 80 ~ 100 cm SOC 密度)。

表 4 随机森林的解释能力
Table 4 Performance of forest tree model

土层 (cm)	R^2	
	Log(SOC)	Log(SOCD)
0 ~ 20	0.68	0.52
20 ~ 40	0.58	0.49
40 ~ 60	0.49	0.35
60 ~ 80	0.45	0.23
80 ~ 100	0.51	0.35

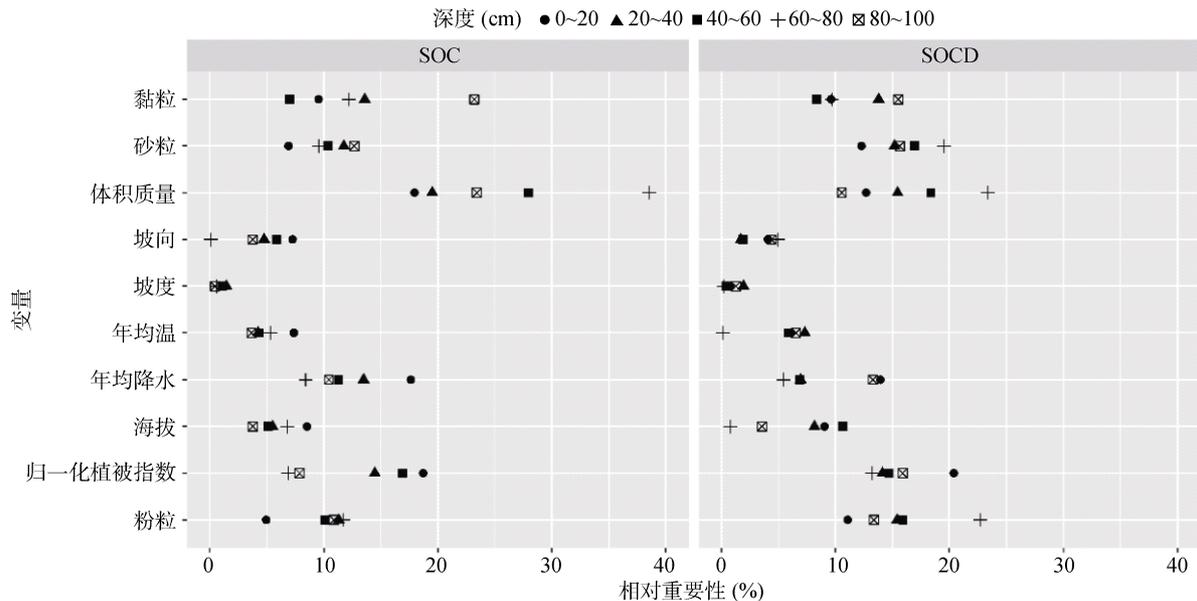


图 3 主要环境因子和土壤属性对有机碳含量和密度影响的相对重要性
Fig. 3 Relative importance of variables to SOC and SOCD based on random forest model

将 SOC 含量和密度的影响因子划分为两类,即土壤要素(体积质量、黏粒、粉粒和砂粒)和环境要素(NDVI、年均降水、年均温、海拔、坡度和坡向)。表明环境要素对表层 SOC 含量和密度起主导作用,相对贡献率分别为 60.7% 和 54.3%;而对于表下层土壤,土壤要素对 SOC 含量和密度的影响高于环境要素。其中土壤要素对 60 ~ 80 cm 土层 SOC 含量和密度的相对影响能力最大,分别达到 72% 和 75.2%。

同时,随着环境因素对 SOC 含量和密度的相对贡献率降低,或者随土壤因素相对贡献率的升高,模型对 SOC 含量和密度的预测能力逐渐减弱。当环境

要素的相对贡献率占到最高的 60.7% 时,对 SOC 含量的预测能力达到最高的 68%,而当土壤要素的相对贡献率占到最高的 75.2% 时,对 SOC 密度的预测能力最低,仅为 24.8%。

3 讨论

研究表明,SOC 含量的产生与积累受多种因素的影响,其中既包括气候、植被、地形等环境因子,也包括土壤体积质量、机械组成等土壤属性要素,这些因素影响 SOC 含量积累的机制非常复杂,在不同区域或不同研究尺度表现不同。研究区气候、地形地

貌、成土母质复杂多样,即使很小区域,水热条件和景观水平的垂直分异也非常强烈,导致形成的土壤类型多样,SOC 含量的积累特征与剖面垂直分布模式多样。

对于本研究区而言,寒冻温度状况抑制了微生物活性和有机物质的分解,是 SOC 含量高积累的决定因子^[26-27]。而另一方面,降水影响生物量和有机物质来源,进而影响 SOC 含量的累积。有研究表明,在祁连山区以及青藏高原,降水与土壤含水量是影响地上和地下生物量以及 SOC 含量空间变异的关键因子^[1, 28]。在本研究中,NDVI 与降水存在显著相关性。另一方面,土壤机械组成(黏粒、粉粒、砂砾)和土壤体积质量也能显著影响 SOC 含量与密度。土壤颗粒组成与 SOC 含量的积累和矿化关系密切,一般认为,黏粒和粉粒的增加有利于 SOC 含量的积累,减缓微生物对其分解速度^[29],提高土壤的持水性能^[30],这均有助于 SOC 含量的积累。研究区 SOC 含量在不同深度土层均有中等以上变异,这是由于研究区巨大的地形-气候梯度造成了水热条件的差异并进一步驱动了 SOC 含量的空间变异。环境要素对 SOC 含量的决定作用在表层 0~20 cm 最为显著,而影响 SOC 含量最重要的环境因子为 NDVI 和年均降水。这是因为表层土壤对降水有更快、更直接的响应^[31],而且表层土壤是植被特别是草原植被根系的集中区域,因此表层 SOC 含量更多受环境因子的控制^[28]。随着土壤深度的增加,降水和植物根系的影响逐渐降低,对 SOC 含量的预测能力随深度呈现减弱的趋势,同时土壤因子(颗粒组成、体积质量)的相对重要性随深度有所增加,这与他人的研究有一致性^[23]。SOC 含量的积累主要是生物过程的产物,与环境因子(如植被、降水)有更直接的相关性,环境因子的相对重要性高时,对 SOC 含量预测能力强;而土壤属性更多是间接作用,土壤因子(颗粒组成、体积质量)贡献率高时,模型的预测能力往往较差。

4 结论

对祁连山中段而言,SOC 含量剖面垂直分布模式分为陡降型、渐降型、稳定型、中间高型 4 个类型,分布模式与环境因子和土壤颗粒组成之间关系不明显;SOC 含量的变异较大,随着深度的增加从中度变异过渡到强度变异;影响表层土体 SOC 含量的主要因子是环境要素中 NDVI 和年均降水,而影响下层土体 SOC 含量的主要因子是土壤颗粒组成。

参考文献:

- [1] Liu W, Chen S, Qin X, et al. Storage, patterns, and control of soil organic carbon and nitrogen in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(3): 35401
- [2] Prietzel J, Christophel D. Organic carbon stocks in forest soils of the German Alps[J]. *Geoderma*, 2014, 221: 28-39
- [3] Bockheim J G, Munroe J S. Organic carbon pools and genesis of alpine soils with permafrost: A review[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2014, 46(4): 987-1006
- [4] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436
- [5] Yang F, Zhang G, Yang J, et al. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519(D): 3086-3093
- [6] 马渝欣, 李徐生, 李德成, 等. 皖北平原蒙城县农田土壤有机碳空间变异及影响因素[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1153-1159
- [7] 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
- [8] Yang R, Zhang G, Yang F, et al. Precise estimation of soil organic carbon stocks in the northeast Tibetan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21842
- [9] 杨帆, 黄来明, 李德成, 等. 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1226-1236
- [10] Wang S, Huang M, Shao X, et al. Vertical distribution of soil organic carbon in China[J]. *Environmental Management*, 2004, 33(1): S200-S209
- [11] 马渝欣, 李德成, 李徐生, 等. 利用农田表层 (0~20 cm) 有机碳估算 1 m 土体有机碳的可靠性[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 189-193
- [12] Badger W B, Simmons A T, Murphy B M, et al. Relationship between environmental and land-use variables on soil carbon levels at the regional scale in central New South Wales, Australia[J]. *Soil Research*, 2014, 51(8): 645-656
- [13] 薛晓娟, 李英年, 杜明远, 等. 祁连山东段南麓不同海拔土壤有机质及全氮的分布状况[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 642-649
- [14] 何志斌, 赵文智, 刘鹤, 等. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2572-2577
- [15] 车宗玺, 刘贤德, 车宗奇, 等. 祁连山青海云杉林土壤有机质及氮素的空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 164-169
- [16] 朱凌宇, 潘剑君, 张威. 祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 668-675
- [17] 马文瑛, 赵传燕, 王超, 等. 祁连山天老池小流域土壤有机碳空间异质性及影响因素[J]. *土壤*, 2010, 46(3): 426-432

- [18] 胡光成, 金晓娟, 万力, 等. 祁连山区植被生长与水热组合关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2): 17–20
- [19] 王金叶, 常学向, 葛双兰, 等. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布[J]. 西北林学院学报, 2001, 16(z1): 1–3
- [20] 金博文, 康尔泗, 宋克超, 等. 黑河流域山区植被生态水文功能的研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(5): 580–584
- [21] 龚子同, 张甘霖. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012
- [22] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35–43
- [23] Hobley E, Wilson B, Wilkie A, et al. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia[J]. Plant and Soil, 2015, 390(1–2): 111–127
- [24] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 851–860
- [25] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
- [26] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(3): 279–293
- [27] 李娜, 王根绪, 高永恒, 等. 青藏高原生态系统土壤有机碳研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(4): 512–519
- [28] Yang Y, Fang J, Tang Y, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. Global Change Biology, 2008, 14(7): 1592–1599
- [29] Telles E D C C, de Camargo P B, Martinelli L A, et al. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 31
- [30] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. Soil Science Society of American Journal, 2006, 70(5): 1569–1578
- [31] He Z, Zhao W, Liu H, et al. The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: A case study in northwestern China's Qilian Mountains[J]. Journal of Hydrology, 2012, 420: 183–190

Profile Vertical Distribution Modes of SOC and Influential Factors in Qilian Mountains

YANG Min^{1,2}, YANG Fei^{1,2}, YANG Renmin^{1,2}, YANG Fan^{1,2}, ZHANG Ganlin^{1*}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 97 soil profiles were surveyed across the Qilian Mountains using a purposively sampling strategy. Vertical variations in profiles of soil organic carbon (SOC) and their correlation with various environmental variables (mean annual precipitation and temperature, altitude, slope gradient and aspect, NDVI) and soil attributes (particle size composition and bulk density) were analyzed. Results showed that there were 4 kinds of SOC profile distribution modes: homogeneous, surface-accumulated, gradually-decreasing and chaotic modes. Both SOC content and density had moderate to strong spatial variability, and the variation coefficient increased with depth. Analysis of random forest proved that the surface soil layer (0–20 cm) had the best model performance with R^2 reaching 0.68 and 0.52 for SOC content and SOC density respectively, and R^2 decreased with increasing soil depth. Moreover, the environmental factors of NDVI and mean annual precipitation were the main influential factors for variations of surface SOC content and density, but the influence of soil attributes on SOC content and density was intensified with increasing soil depth.

Key words: Soil organic carbon; Profile vertical distribution mode; Soil organic carbon density; Environmental variables; Qilian Mountain