

史尧方, 薛 娴, 尤全刚, 等. 阿里荒漠区土壤有机碳分布特征及其与土壤物理性质的关系[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 284–294.

阿里荒漠区土壤有机碳分布特征及其与土壤物理性质的关系

史尧方^{1,2}, 薛 娴^{1,2}, 尤全刚¹, 彭 飞^{1,2}, 黄翠华¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为完善阿里荒漠区土壤本底数据, 提高对高寒荒漠土壤碳汇水平的认识, 以青藏高原阿里荒漠区 0~100 cm 土层为研究对象, 通过对分布在全区 34 个样点的野外调查、样品收集与室内试验, 探讨了土壤有机碳含量(soil organic carbon, SOC)与土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)的分布特征及其与植被类型和土壤物理性质的关系。结果表明:(1) 0~100 cm 深度的 SOC 和 SOCD 均值分别为 $3.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 在全国范围内处于较低水平; 在垂直方向上, SOC 与 SOCD 从表层逐渐向深层递减, 具有明显的表聚现象。(2) 全区的 SOC 与 SOCD 表现为强变异性, 而且因植被类型不同呈显著差异 ($P \leq 0.05$), 水平方向上呈现为由东北向西南从荒漠草原、草原化灌木荒漠、半灌木-矮半灌木荒漠再到无植被区域的递减趋势。(3) 区内土壤的容重和砂粒含量随深度增加而逐渐增加, 含水量、黏粒含量和粉粒含量逐渐减少, 在部分植被盖度低的区域土壤含水量和黏粒含量随土层深度呈现出低-高-低趋势。土壤含水量、粉粒含量和黏粒含量与 SOC 呈显著正相关 ($P \leq 0.05$), 土壤砂粒含量与 SOCD 呈显著负相关 ($P \leq 0.05$)。

关键词: 阿里荒漠区; 土壤有机碳含量; 土壤有机碳密度; 土壤物理性质

文章编号: 1000-694X(2023)03-284-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00015

中图分类号: S153

文献标志码: A

0 引言

针对全球气候变暖, 中国政府提出了“碳达峰”和“碳中和”的“双碳”目标, 旨在通过减少碳排放和增加陆地生态系统碳汇来实现 CO_2 的近零排放^[1]。土壤作为陆地生态系统中最大、最活跃的碳库, 储存了约 $1\,550 \text{ Pg}$ 有机碳, 储量分别为大气碳库和陆地生物量碳库的 2 倍和 3 倍^[2]。因此, 土壤碳库可视为大气 CO_2 的重要源和汇, 其微小变化都可能引起大气 CO_2 浓度的显著改变^[3-4]。荒漠约占中国陆地总面积的 17%^[5]。由于荒漠地区的植被覆盖率和生产力远远低于其他陆地生态系统, 该类生态系统中的碳主要以土壤碳的形式存在。荒漠土壤对实现陆地生态系统的碳平衡的贡献尤为重要, 具有重要的生态碳汇作用^[6-7]。中国荒漠生态系统整体表现

为碳汇^[8]。1980—2010 年中国荒漠土壤有机碳库从 1.5 Pg C 增加至 1.7 Pg C ^[8]。对毛乌素沙漠、古尔班通古特沙漠等荒漠进行通量观测, 发现其都有明显的碳汇过程^[9-12]。因此, 荒漠土壤碳库对于全球碳循环影响不容忽视。

高寒荒漠是分布于青藏高原的特殊荒漠类型, 受干旱、高海拔和低温影响, 是荒漠中生态最脆弱的生态类型^[13]。虽然高寒荒漠区植被盖度低、种类少, 但由于区域面积大, 高寒荒漠在整个青藏高原陆地生态系统的碳循环中占据重要地位。青藏高原是地球陆地生态系统的重要组成部分, 也是世界上低纬度冻土集中分布区, 因其独特的地理环境和生态系统对全球气候变化极为敏感^[13-14]。青藏高原当前整体处于碳汇阶段, 碳汇总量占全国陆地碳汇总量的 12%~16%^[15-16], 因此加强该地区土壤碳储量

收稿日期: 2023-02-14; 改回日期: 2023-03-07

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0305)

作者简介: 史尧方(1997—), 女, 山西阳泉人, 硕士研究生, 主要从事沙漠化与沙漠环境研究。E-mail: shiyaofang@niger.ac.cn

通信作者: 薛娴(E-mail: xianxue@lzb.ac.cn)

估算及其分布特征研究对于陆地碳库的精确预测和应对全球气候变化具有重要意义。目前关于青藏高原土壤碳库的研究已有许多成果。Fang等^[17]基于1:100万土壤类型图估算整个青藏高原SOC储量(0~72 cm)为38.4 Pg;王根绪等^[18]基于国家土壤普查分类体系估算青藏高原草地SOC储量(0~60 cm)为33.52 Pg;Zhao等^[19]综合EVI、LST和DEM等数据估算青藏高原多年冻土区的SOC储量(0~200 cm)为17.07 Pg;Ding等^[20]在前人研究的基础上运用模型重新评估了青藏高原3 m深度冻土碳库(36.6 Pg C)。尽管这些研究加深了我们对青藏高原碳库研究的认识,然而受制于自然环境与交通等方面的影响,对高寒荒漠区土壤碳库的认识仍欠缺,本底数据鲜见^[21-22]。

阿里荒漠区作为藏北高寒荒漠的主体,对其土壤碳的系统调查分析有助于全面掌握中国荒漠区土壤碳储存,也对于保护青藏高原这一特殊生态系统有重要科学意义。基于此,本文以阿里荒漠区土壤为研究对象,揭示高寒荒漠区土壤有机碳含量(soil organic carbon, SOC)与土壤有机碳密度(soil

organic carbon density, SOCD)的垂直与水平分布特征,并分析其与土壤理化因子的关系,旨在促进高寒荒漠区土壤的本底探查,并为高寒荒漠区土壤分布特征及碳库研究积累基础数据与理论依据。

1 研究区概况

研究区位于青藏高原西北部阿里地区,行政区划上包括噶尔县、日土县、革吉县的全部以及改则县的部分地区,总面积约6.36万km²,区内多分布季节冻土,在东北部有多年冻土分布。全区平均海拔4500 m以上(图1),在地貌单元上属于藏北高原湖盆区下的日土-革吉宽谷亚区^[23],地貌类型以河流宽谷、湖盆、山间盆地、山前冲洪积扇平原与冲洪积扇为主。在气候分区上属于大陆性温凉干旱气候区,年平均气温-0.2~-0.1℃,最热月(7—8月)平均气温13~14℃,最冷月(12月至次年1月)平均气温-9~-12℃,多年平均降水量为60~190 mm,集中分布在7—8月,降水从南向北递减,南部地区多年平均降水量可达168 mm,而北部仅54 mm,区域差异明显^[24]。

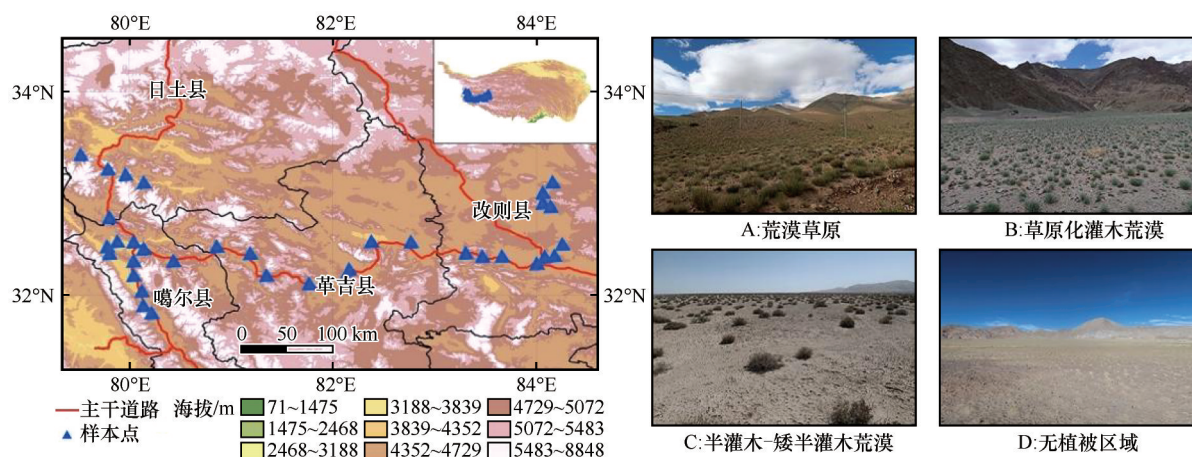


图1 研究区位置、样点分布以及主要生态系统景观照片

Fig.1 Location, sample distribution and main ecosystem landscape in the study area

研究区内常见荒漠植被分布,植被盖度0~25%。依照中国植被类型区划标准^[25-26],研究区内的荒漠大致可分4种:①荒漠草原,也称为半荒漠-草原群落交错区,由多年生旱生丛生矮禾草和强旱生矮半灌木-灌木参与构成的草原植被类型,是草原向荒漠过渡的生态类型。区内以针茅(*Stipa capillata*)为代表的矮禾草在荒漠草原中占据绝对优势,常常伴生旱蒿(*Artemisia xerophytica*)、矮丛蒿(*Artemisia caespitosa*)和细叶亚菊(*Ajania tenuifo-*

lia)等强旱生的小半灌木。植被盖度20%~25%。②草原化灌木荒漠,由强旱生灌木为建群层片,伴生有草原旱生禾草,是荒漠草原带向荒漠带过渡的类型。主要由矮锦鸡儿(*Caragana pygmaea*)、刺叶柄棘豆(*Oxtripis aciphylla*)和四合木(*Tetraena mongolica*)等为建群种并夹杂草原成分组成的群落所组成。群落的种类组成比较丰富,盖度10%~20%。③半灌木-矮半灌木荒漠,由强旱生半灌木和矮半灌木为建群种形成的植物群落,常生于山麓冲积平

原与山麓洪积扇。主要建群种有高山绢蒿(*Seriphidium rhodanthum*)、灌木亚菊(*Ajania fruticulosa*)和驼绒藜(*Ceratoides latens*)等,植被盖度 5%~10%。
④无植被区域,区内少见植被分布,地表裸露,多砾石与砂粒分布,植被盖度低于 3%。

2 研究材料与方法

2.1 样地设置及野外调查

由于研究区多为无人区和军事管制区,区内样地多沿主干道路分布,为减少人为因素对区内环境的影响,在样地布设时尽可能远离主干道路,因此本研究主要依据可达性,以均匀分布为原则,选择

了 34 个典型高寒荒漠样地(图 1),在 2020 年 7 月进行实地调查和样品收集。调查过程中,首先记录样地的经纬度、海拔、地貌和植被类型等,然后进行土壤剖面挖掘和样品采集(表 1)。

2.2 土壤样品采集

野外土壤样品主要包括两类,一类是供土壤含水量和容重测定的土壤环刀样品,一类是去除根系等杂质后用于测定土壤理化性质的土壤样品。

土壤环刀样品采集时首先挖掘新鲜剖面(图 2),先记录剖面特征,然后用环刀按照 0~5、5~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 的深度进行分层取样,每层取 3 个重复样品,采集完成后记录环刀样品湿重。

表 1 采样点基本信息
Table 1 Basic information of sampling points

荒漠类型	样点 数	采样深度 /cm	典型植被群系	植被盖度 /%
荒漠草原	9	0~100	沙生针茅(<i>Stipa glareosa</i>)、针茅-冷蒿(<i>Stipa capillata-Artemisia frigida</i>)、针茅-亚菊(<i>Stipa capillata-Ajania achilleoides</i>)、芨芨草-驼绒藜(<i>Achnatherum splendens-Ceratoides latens</i>)等	15~25
草原化灌木荒漠	10	0~100	刺叶柄棘豆(<i>Oxtropis aciphylla</i>)、矮禾草;四合木(<i>Tetraena mongolica</i>)、矮禾草、矮锦鸡儿(<i>Caragana pygmaea</i>)、矮禾草、细叶亚菊(<i>Ajania tenuifolia</i>)、矮禾草等	8~15
半灌木-矮半灌木荒漠	8	0~100	驼绒藜(<i>Ceratoides latens</i>)、灌木亚菊(<i>Ajania fruticulose</i>)、灌木亚菊-锦鸡儿(<i>Ajania fruticulose-Caragana sinica</i>)、驼绒藜-紫菀木(<i>Ceratoides latens-Asterothamnus alyssoides</i>)等	3~8
无植被区域	7	0~100	少见植被	<3

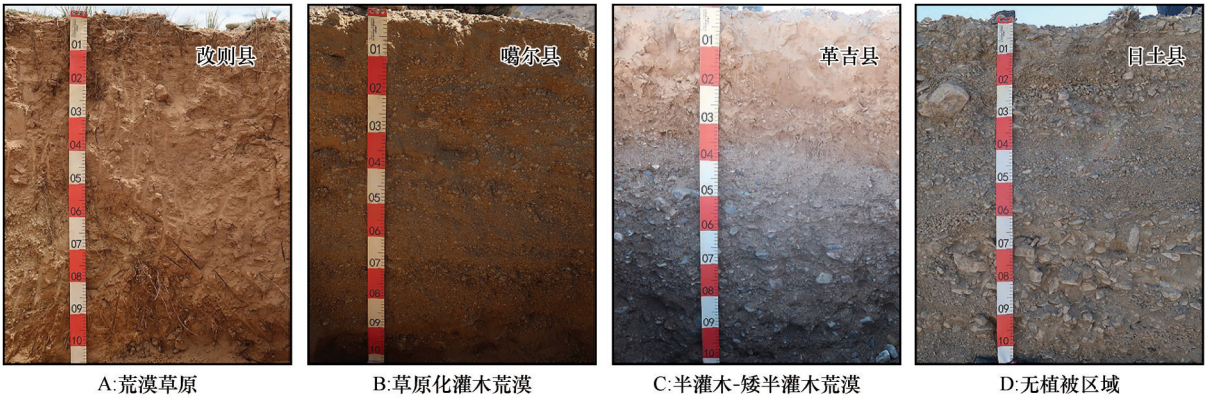


图 2 不同荒漠类型的典型剖面照片

Fig.2 Typical profile photos of different desert types

在土壤剖面周围直径 500 m 范围内随机选取地表类型相似的 3 个样点,利用土钻分别钻取相同深度和层数的土壤样品。由于部分样点不同深度以下土壤剖面为粗大砾石,无法取样,故本研究采集到的土壤样品总数为 359 个。样品装入自封袋带回室内,进行晒干剔除杂质等预处理。然后采用四分

法选取足量的土壤样品各两份,一份土壤过 2 mm 筛用于测定土壤机械组成,一份土壤研磨通过 0.149 mm 筛子用于测定 SOC。

2.3 室内测定和分析

SOC 的测定采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法;

土壤容重采用环刀法;土壤含水量采用铝盒烘干法;土壤颗粒组成采用激光粒度分析仪测定^[27]。根据美国农业部制土壤颗粒分级标准,将土壤颗粒划分为砂粒(2.00~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.02 mm)、黏粒(<0.02 mm)^[28]。

土壤有机碳密度(SOCD)指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量。

$$SOCD = \sum \frac{SOC_i \times \gamma \times H_i \times (1 - \delta_{2mm})}{100} \quad (1)$$

式中:SOCD代表土壤有机碳密度,kg·m⁻²;i代表不同土层层次;SOC代表土壤有机碳含量,g·kg⁻¹;γ表示容重,g·cm⁻³;H表示土层i的厚度,cm;δ_{2mm}表示土壤中直径>2 mm的砾石含量百分比,%。

2.4 统计分析

本研究主要采用方差分析方法研究荒漠类型和土层深度对土壤有机碳垂直分布特征的影响是否存在显著差异;运用相关分析方法研究土壤物理性质与SOCD的相关关系。以上统计分析均利用SPSS 21 软件实现。此外,运用地统计学方法进行空间结构分析,其中半方差函数的计算及拟合模型在GS+9.0 上进行,水平分布特征在ArcGIS 10.6 软件平台上实现。

3 研究结果

3.1 阿里荒漠区土壤有机碳垂直分布特征

研究区内0~100 cm 深度的SOC 与SOCD 描述性统计结果见表2,该统计能直接反映SOC 与SOCD 的基本特征。研究区各土层SOC 与SOCD 平均含量变化范围分别为2.82~5.28 g·kg⁻¹ 与0.67~1.42 kg·m⁻²。0~100 cm 土层深度的SOC 和SOCD 均值为3.74 g·kg⁻¹ 和4.91 kg·m⁻²。随着土层深度的增加,SOC 与SOCD 逐渐减少,0~20 cm 土层的SOC 与SOCD 平均含量分别占100 cm 深度土层SOC 与SOCD 的28.22% 和28.92%,表明阿里荒漠区SOC 与SOCD 有表层聚集现象。阿里荒漠区不同土层SOC 与SOCD 均为中等强度变异水平,数据离散程度适中,变异系数均表现为表层高于底层。各层SOC 与SOCD 偏度系数为正,说明SOC 与SOCD 分布的右侧有较长尾部,低值相对较多,说明各层土壤内出现了不少极值,这与研究区各层SOC 与SOCD 的范围相距较大的分布情况相吻合。研究样本通过了K-S 统计检验,说明总体来说,研究区所选样本SOC 与SOCD 数据符合正态分布,数据具有代表性。

表2 阿里荒漠区不同土层土壤有机碳(SOC)及其密度(SOCD)描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of SOC and SOCD at different soil depths in Ali Desert Area

指标	土层深度/cm	最小值	最大值	平均数	标准差	变异系数	偏度	峰度
SOC/(g·kg ⁻¹)	0~20	0.26	13.15	5.28	3.27	0.62	0.85	1.01
	20~40	0.36	10.84	3.84	1.99	0.52	0.71	0.40
	40~60	0.19	9.55	3.54	1.92	0.54	0.26	-0.36
	60~80	0.40	7.55	3.23	1.65	0.51	0.23	-0.28
	80~100	0.25	6.51	2.82	1.38	0.49	0.91	-0.07
SOCD/(kg·m ⁻²)	0~20	0.16	3.90	1.42	0.91	0.64	0.62	0.06
	20~40	0.10	2.56	1.02	0.53	0.52	0.57	-0.03
	40~60	0.00	2.44	0.96	0.53	0.55	0.34	-0.35
	60~80	0.01	1.80	0.84	0.39	0.46	0.16	-0.70
	80~100	0.01	1.68	0.67	0.26	0.39	0.50	0.30

植被覆盖类型和覆盖程度是影响SOC 与SOCD 最直接的因素。对不同土壤深度下的荒漠草原、草原化灌木荒漠、半灌木-矮半灌木荒漠和无植被区域的SOC 与SOCD 做方差分析(图3),发现在0~20 cm 土层中,荒漠草原的SOC 与SOCD 的显著高于草原化灌木荒漠、半灌木-矮半灌木荒漠和无

植被区(P≤0.05),表现出从草原到荒漠再到裸地的递减趋势。在20~40、40~60、60~80 cm 土层,荒漠草原与无植被区域的SOC 差异显著(P≤0.05),草原化灌木荒漠与半灌木-矮半灌木荒漠的SOC 无显著差异(P>0.05)。40~60 cm 和60~80 cm 土层半灌木-矮半灌木荒漠和无植被区域随着土层深度的增加

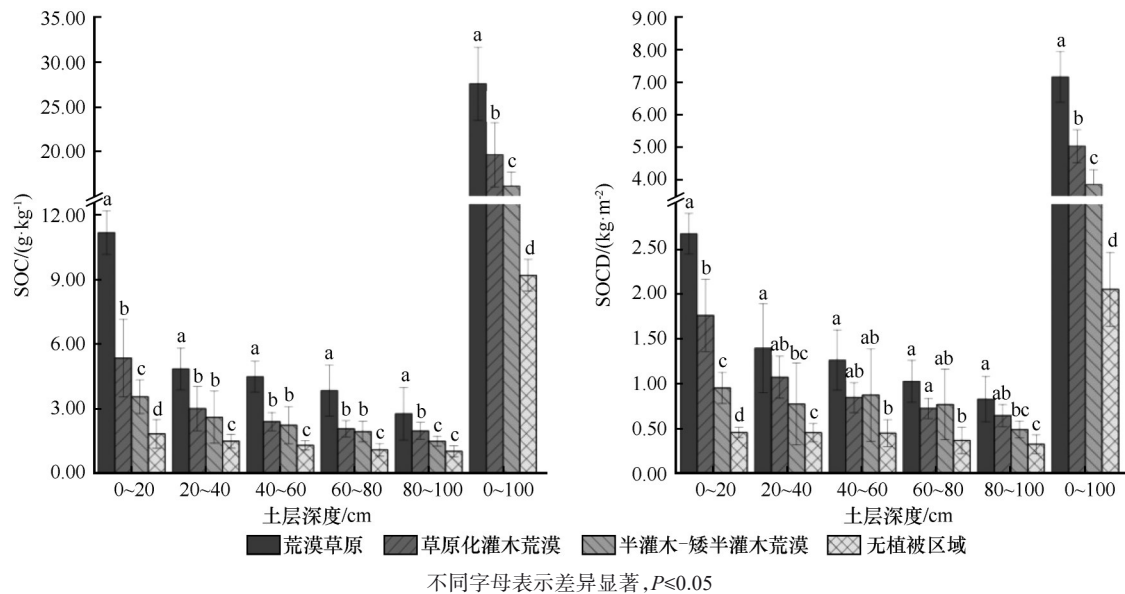


图3 阿里荒漠区不同荒漠类型土壤有机碳(SOC)及其密度(SOCD)垂直分布
Fig.3 Vertical distribution of SOC and SOCD in different desert types in Ali Desert Area

SOCD 差异趋于不显著 ($P > 0.05$)。80~100 cm 土层荒漠草原与无植被区域的 SOC 和 SOCD 均差异显著 ($P \leq 0.05$), 而半灌木-矮半灌木荒漠与无植被区域的 SOC 和 SOCD 均差异未达显著水平 ($P > 0.05$)。0~100 cm 深度 SOC 与 SOCD 的累积含量均表现为荒漠草原最高, 草原化灌木荒漠次之, 半灌木-矮半灌木荒漠再次之, 无植被区域最小, 各荒漠类型间的 SOC 与 SOCD 累积含量差异显著 ($P \leq 0.05$)。总而言之, 阿里荒漠区的 SOC 和 SOCD 含量表现出荒漠草原 > 草原化灌木荒漠 > 半灌木-矮半灌木荒漠 > 无植被区域。

3.2 阿里荒漠区土壤有机碳水平分布特征

半方差分析能较好地刻画土壤有机碳空间分布的随机性和结构性等, 其模型的选择主要根据决定系数 R^2 来决定, 并综合考虑 RSS (残差)、块金值和有效距离。研究区 SOC 与 SOCD 选择线性模型进行拟合, 决定系数 R^2 分别为 0.10 和 0.18, 虽然不高, 但残差较小, 故选择线性模型。阿里荒漠区 0~100 cm 的 SOC 与 SOCD 块金值 C_0 为 0.23 和 0.24 (表 3), 表明在当前采样密度下存在着由试验误差、采样误差和

采样间距的变异等随机因素共同引起的变异。SOC 与 SOCD 块金效应 $C_0/(C_0+C)$ 为 88%、100%, 按照区域化变量空间相关性程度的分级标准, SOC 与 SOCD 属于强空间变异, 空间相关性很弱。从步长距离来看, SOC 与 SOCD 的变程距离分别为 12.33 km 与 14.51 km, 空间自相关范围较小。

为直观反映研究区内土壤有机碳的水平分布格局, 运用半方差模型结果在 ArcGIS 10.6 软件平台进行空间插值, 得到研究区的土壤有机碳水平分布图 (图 4~5)。0~100 cm 土壤深度内 SOC 累计含量 $5.00 \sim 10.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域分布最广, SOCD 为 $2.00 \sim 3.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域分布最广, 总体水平均较低, 与统计结果一致。纵观整个研究区 0~100 cm 土层 SOC 与 SOCD 的水平分布图, 发现该区 SOC 与 SOCD 整体呈现出由东北向西南的递减规律, 低值区则主要位于北部日土县, 高值出现在东部改则县。一般来说, 植被分布状况是影响该区有机碳空间分布的重要因素。叠加基于遥感反演的 2010—2015 年青藏高原高寒草地上生物量空间分布图^[29], 发现 SOC 和 SOCD 与地上生物量的空间分布基本一致, 均呈现东高西低的变化趋势。

表3 阿里荒漠区 0~100 cm 土层土壤有机碳(SOC)及其密度(SOCD)理论模型和参数
Table 3 Theoretical model and parameters of SOC and SOCD in 0~100 cm in Ali Desert Area

指标	理论模型	块金值 C_0	基台值 $C+C_0$	块基比 $C_0/(C+C_0)$	步长	决定系数 R^2	残差 RSS
SOC	线性模型	0.23	0.26	0.88	12.33	0.10	0.00
SOCD	线性模型	0.24	0.24	1.00	14.51	0.18	0.01

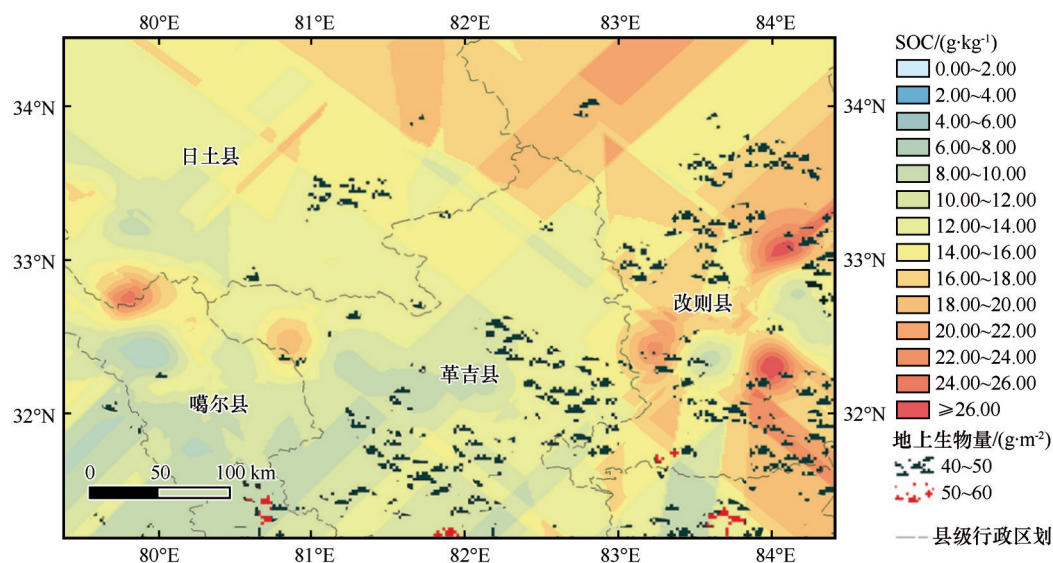


图4 阿里荒漠区0~100 cm 累积土壤有机碳(SOC)水平分布

Fig.4 Horizontal distribution of accumulated SOC in 0–100 cm in Ali Desert Area

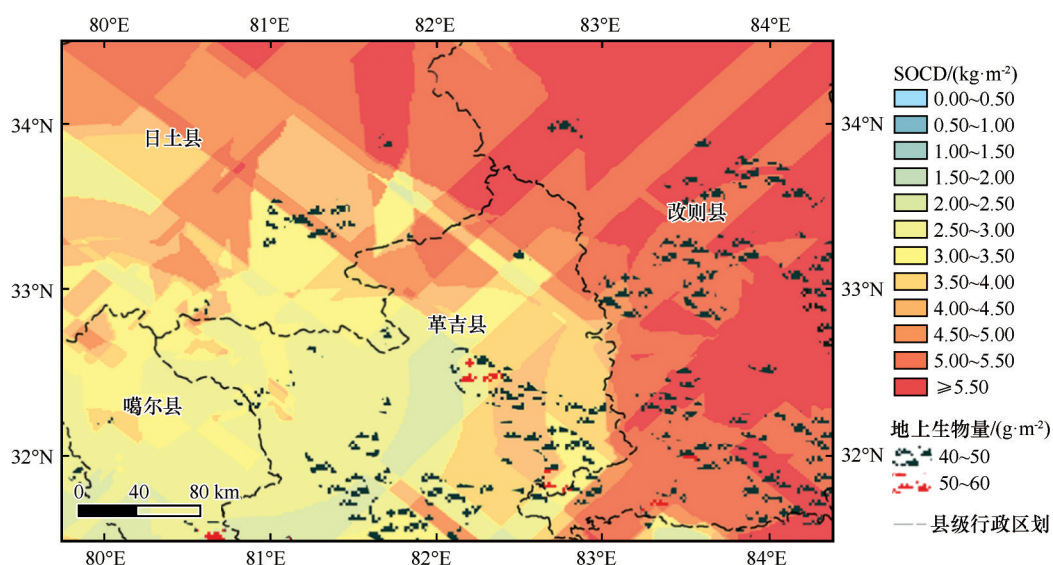


图5 阿里荒漠区0~100 cm 深度累积有机碳密度(SOCD)水平分布

Fig.5 Horizontal distribution of accumulated SOCD in 0–100 cm in Ali Desert Area

3.3 土壤物理性质及其与土壤有机碳密度的关系

3.3.1 土壤物理性质分布特征

阿里荒漠区土壤物理性质随不同荒漠类型呈有规律的变化(表4)。土壤容重和土壤砂粒含量表现出从荒漠草原、草原化灌木荒漠、半灌木-矮半灌木荒漠到无植被区域递增趋势;土壤含水量、土壤粉粒含量和土壤黏粒含量表现出从荒漠草原、草原化灌木荒漠、半灌木-矮半灌木荒漠再到无植被区域递减的趋势。

研究区内各层土壤容重的变化趋势不显著,但表层与深层的土壤容重差异显著($P \leq 0.05$)。荒漠草

原和草原化灌木荒漠的土壤含水量随着土层深度的增加而增加且差异显著($P \leq 0.05$),半灌木-矮半灌木荒漠和无植被区域的含水量大致呈现出低—高一低的变化趋势。在机械组成方面,全区土壤砂粒含量随着土层深度的增加而增加,表层与底层砂粒含量差异显著($P \leq 0.05$);全区土壤粉粒含量随着土层深度的增加而减少;土壤黏粒含量在荒漠草原和草原化灌木荒漠随土层深度的增加呈现高一低趋势,半灌木-矮半灌木荒漠呈现低—高趋势,无植被区域则呈现低—高一低趋势。

3.3.2 土壤有机碳密度与土壤物理性质的相关性分析

在土壤物理性质中土壤容重(BD)是计算土壤

表 4 不同荒漠类型下各土层深度土壤物理性质
Table 4 Soil physical properties in different soil depths of different deserts

荒漠类型	土层/cm	容重/(g·cm ⁻³)	含水量/%	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
荒漠草原	0~20	1.34±0.15 ^b	11.42±1.96 ^a	19.21±0.21 ^c	77.21±0.09 ^a	3.57±0.11 ^a
	20~40	1.39±0.15 ^b	7.43±0.36 ^b	23.53±1.25 ^d	73.26±1.17 ^b	3.20±0.09 ^b
	40~60	1.47±0.10 ^{ab}	5.54±0.53 ^c	29.30±0.28 ^c	68.01±0.07 ^c	2.68±0.22 ^c
	60~80	1.52±0.08 ^{ab}	4.01±0.22 ^d	35.64±3.76 ^b	62.58±3.48 ^d	1.76±0.29 ^d
	80~100	1.63±0.08 ^a	2.49±0.32 ^e	64.72±4.56 ^a	34.42±4.50 ^e	0.85±0.08 ^e
草原化灌木荒漠	0~20	1.44±0.13 ^b	7.50±0.94 ^a	37.77±6.83 ^d	59.56±6.30 ^a	2.65±0.60 ^a
	20~40	1.52±0.07 ^{ab}	6.10±0.08 ^b	56.72±3.09 ^c	41.67±2.98 ^b	1.60±0.11 ^b
	40~60	1.57±0.04 ^{ab}	4.29±0.35 ^c	63.84±0.05 ^b	34.86±0.03 ^c	1.29±0.02 ^b
	60~80	1.64±0.10 ^a	3.22±0.24 ^d	64.80±0.40 ^b	34.06±0.35 ^c	1.13±0.05 ^{bc}
	80~100	1.68±0.13 ^a	2.59±0.07 ^d	81.63±4.71 ^a	17.68±4.41 ^d	0.67±0.43 ^c
半灌木-矮半灌木荒漠	0~20	1.47±0.10 ^b	1.95±0.20 ^b	78.52±1.52 ^c	20.75±1.43 ^a	0.26±0.20 ^a
	20~40	1.49±0.08 ^b	2.60±0.82 ^{ab}	83.70±1.96 ^c	15.81±1.92 ^b	0.48±0.06 ^a
	40~60	1.55±0.11 ^{ab}	1.55±0.03 ^c	85.63±0.09 ^b	14.10±0.04 ^b	0.25±0.06 ^a
	60~80	1.58±0.12 ^{ab}	3.34±1.50 ^a	89.18±0.82 ^b	14.93±0.79 ^c	0.60±0.32 ^a
	80~100	1.67±0.05 ^a	0.62±0.21 ^d	92.75±1.79 ^a	10.66±1.66 ^d	1.18±2.24 ^a
无植被区域	0~20	1.53±0.09 ^b	0.79±0.06 ^c	79.91±0.70 ^d	19.27±0.46 ^a	0.06±0.05 ^c
	20~40	1.51±0.20 ^b	0.59±0.01 ^d	86.23±1.35 ^c	13.36±1.33 ^b	0.21±0.03 ^c
	40~60	1.62±0.09 ^{ab}	2.01±0.17 ^b	88.84±0.69 ^b	10.83±0.68 ^c	0.32±0.01 ^b
	60~80	1.67±0.06 ^{ab}	1.43±0.21 ^a	90.16±0.45 ^b	9.62±0.42 ^c	0.80±0.24 ^a
	80~100	1.77±0.08 ^a	0.41±0.02 ^d	93.05±1.31 ^a	6.87±1.28 ^d	0.39±0.02 ^b

表中同列数字后标有不同字母表示差异显著($P\leq0.05$)。

有机碳密度(SOCD)的参数,直接影响着土壤有机碳密度大小,故土壤容重不作为相关分析的因子。对土壤有机碳密度(SOCD)、土壤水分、土壤砂粒含量、土壤粉粒含量和土壤黏粒含量进行相关分析,得出 SOCD 与土壤物理性质的相关性(图 6)。SOCD 与土壤物理性质的相关性大小表现为砂粒>黏粒>粉粒>含水量,相应的 R^2 值分别为 0.67、0.64、0.38 和 0.37。其中,土壤黏粒含量与 SOCD 呈现极显著正相关关系($P\leq0.01$),土壤含水量和粉粒含量 SOCD 呈现显著正相关关系($P\leq0.05$)。土壤砂粒含量与 SOCD 呈极显著的负相关($P\leq0.01$)。

4 讨论

4.1 阿里荒漠区土壤有机碳特征及成因

研究表明阿里荒漠区的 SOC 较低,且在垂直剖面上,自表层向下逐渐降低,有明显表聚现象。这与 Yang 等^[30]对青藏高原其他草地生态系统 SOC 的

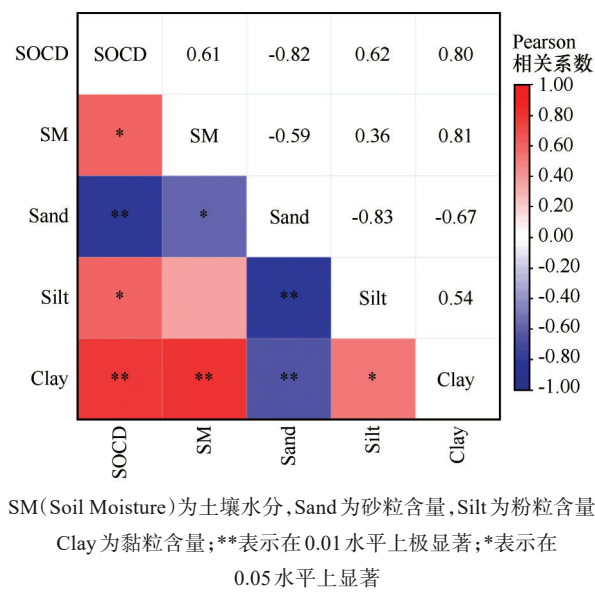


图 6 阿里荒漠区土壤物理性质与土壤有机碳密度(SOCD)的相关关系

Fig.6 Correlation between soil physical properties and soil organic carbon density (SOCD) in Ali Desert Area

分布研究结论较为一致。在高寒地区,根系生物量主要分布在浅土层(0~20 cm),又因低温环境,较深层土壤更易积累土壤有机碳^[31-33],因此表层SOC高于深层。阿里荒漠区土壤SOC平均含量为($3.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),低于2020年刘淑娟等^[34]计算的阿里地区高山荒漠土的SOC含量($7.50 \sim 8.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),也低于2021年李超逸^[35]计算的阿里地区高寒草地平均SOC含量($7.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。原因可能是他们选取的样地多位于高寒草原与高寒草甸区,水分条件较好,植被种类多,覆盖度高,有助于SOC的形成与积累。

阿里荒漠区1 m深度的SOCD含量为 $4.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,与青藏高原北缘区域的SOCD含量相当($4.96 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[36],低于青藏高原平均SOCD含量($7.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[37],远低于全国平均SOCD含量($10.53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[38],在全国范围内处于较低水平。这是因为,阿里荒漠区受限高寒、干旱、多风的地理环境,植被低矮稀疏,生产力较低,土壤碳来源有限,同时低温环境也使得土壤微生物将生物转换有机碳的速度和数量下降,土壤有机碳累积缓慢,因此SOCD含量水平较低。虽然阿里荒漠区的SOCD含量低于全国平均水平,但却高于全国荒漠区SOCD的平均水平($3.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[39]。与其他典型荒漠区相比,同深度下的阿里荒漠区表层(0~20 cm)SOCD($1.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)略高于新疆阿勒泰地区荒漠草地($1.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[40],高于内蒙古西阿拉善荒漠($0.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[41]。这可能是因为阿里荒漠区的土壤发育于更低温气候环境,而低温环境会使得输入土壤中的有机质分解速率变慢,便于有机碳的累积,因此阿里荒漠区SOCD较其他荒漠区高。

4.2 阿里荒漠区土壤有机碳分布特征及原因

阿里荒漠区的SOC与SOCD在荒漠类型上明显地表现出从荒漠草原、草原化灌木荒漠、半灌木-矮半灌木荒漠、无植被区域的递减趋势。一般来说植被模式可以改变一个地区的土壤特性和地表条件,进而影响该区域的土壤有机碳的分布^[42]。荒漠草原多以针茅、沙生针茅和芨芨草等禾草为主要建群种,植被盖度较好,多分布在湖盆宽谷和山前冲洪积扇,有利于土壤有机碳的累积,坡度变化较小,一定程度上保护了地表土壤免受侵蚀,有利于土壤有机碳的积累,因此SOC与SOCD最高;草原化灌木荒漠内刺叶柄棘豆、锦鸡儿和四合木等是主要建群种,群丛内有少数矮禾草植物为伴生种,盖度稀疏,多分布于湖盆宽谷区,故SOC与SOCD略低于

荒漠草原。半灌木-矮半灌木荒漠以驼绒藜和灌木亚菊等典型半灌木与矮半灌木植被为主要的植被群丛,物种单一、低矮、稀疏,大多分布于沟谷和湖盆宽谷,在强风吹蚀和低温环境下,地表粗砾化,不利于土壤有机碳积累;无植被区域几乎无植被分布,地表裸露,多分布于地势较宽阔的山前冲洪积扇上,土壤粗骨化,全剖面砾石含量高,故SOC与SOCD最低。

阿里荒漠区0~100 cm土层累积的SOC与SOCD较低,在水平方向上表现出从东北向西南递减的趋势。究其原因,一方面是荒漠植被类型之间地上生物量影响SOC与SOCD^[42-43]。在实地调查取样中发现研究区东北部区域多分布以矮禾草与矮半灌木参与构成的荒漠草原,植被盖度较好,地上生物量较大,而西南地区山区纵横多分布有以半灌木与矮半灌木构成的高寒荒漠和大片裸地,植被盖度较低,地上生物量较低。因而在地上生物量影响下,SOC与SOCD呈现出从东北向西南递减的趋势,这与Yang等^[44]关于青藏高原高寒草地SOCD的空间分布情况一致。另一方面,冻土是影响土壤碳的关键因子,季节冻土和多年冻土对SOC与SOCD的影响不容忽视^[45-47]。阿里荒漠区内冻土广布,中西部区域属于季节性冻土区,东北部区域属于多年冻土区。冻土区域表层土壤的平均SOC大致相等,并无显著差异;但随着深度的增加,多年冻土的平均SOC大于季节冻土,表明多年冻土的存在会显著影响深层SOC的储存^[48-49]。此外,多年冻土活动层的冻融扰动作用也会使表层土壤有机质向下迁移,在一定程度上增加了深层的SOC含量^[50],因而导致研究区内东北部区域的SOC与SOCD累积含量高于中西部季节冻土区的SOC与SOCD累积含量。

4.3 阿里荒漠区土壤有机碳分布与物理性质关系

土壤质地、结构和土壤水分等直接或间接影响土壤有机质的积累。土壤机械组成决定着土壤质地的粗细,直接影响着土壤的理化性质与有机质的累积情况,是土壤最基本的物理性质^[51]。阿里荒漠区土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别与有机碳密度呈极显著负相关、显著正相关和极显著正相关,这与胡雷等^[52]的研究结论一致。究其原因,土壤砂粒含量多,孔隙大,通气性强,保水性差,有机碳因易矿化分解而减少。而土壤粉粒与黏粒含量增加有利于土壤团聚体的形成从而改善土壤性状,提升土壤

有机质并提高土壤肥力。在土壤含水量方面,阿里荒漠区 SOCD 虽然与土壤含水量显著正相关,但相关性最小。在干旱高寒条件下土壤含水量易受到坡面、坡度、降水和温度等因素的影响,区内样地散落在各类地貌小单元中,坡面和坡度千差万别,因此,土壤水分与 SOCD 的相关性最小,想要进一步探讨该区土壤水分对有机碳的影响机制,需要对该区土壤水分长期定点监测。

5 结论

阿里荒漠区的 SOC 与 SOCD 整体偏低,受植被类型与植被盖度影响,在荒漠类型上呈现出荒漠草原>草原化灌木荒漠>半灌木-矮半灌木荒漠>无植被区域。

阿里荒漠区的土壤有机碳空间变异程度高,0~100 cm 的累积 SOC 与 SOCD 在水平方向上呈现出从东北向西南递减的趋势,与地上生物量分布密切相关。

阿里荒漠区土壤含水量、粉粒含量和黏粒含量与 SOCD 呈显著正相关,土壤砂粒含量与 SOCD 呈显著负相关

本文对研究区的 SOC 与 SOCD 的垂直与水平分布特征做了系统分析,并初步探索了研究区土壤物理性质与 SOCD 的关系,进一步完善了阿里地区土壤本底数据,为高寒荒漠土壤分布特征及碳库研究积累基础数据与理论依据。虽然阿里荒漠区 SOC 与 SOCD 处于全国低等水平,但是高海拔、干旱和寒冷的自然环境使得该区累积在土壤中的碳不易分解,可以更深的贮存在土层之中,从而提高碳汇水平。目前关于高寒荒漠土壤碳分布影响因素的研究相对匮乏,然而影响土壤有机碳分布的因素众多,要想彻底理解高寒荒漠区土壤有机碳分布特征及原因,未来不仅要考虑土壤物理性质对土壤有机碳的影响,还需要考虑气候、地形和微生物等因素,从根本上提高对高寒荒漠地区“双碳”研究的认识。

参考文献:

- [1] 周璞,侯华丽,张惠,等.碳中和背景下提升土壤碳汇能力的前景与实施建议[J].环境保护,2021,49(16):65-69.
- [2] Diffenbaugh, Noah S, Field, et al.Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions[J].Science,2013,341(6145):486-492.
- [3] Eswaran H, Vanderberg E, Reich P.Organic-carbon in soils of the world[J].Soil Science Society of America Journal,1993,57(1):192-194.
- [4] Sundquist E T.The global carbon dioxide budget[J].Science,1993,259(5097):934-941.
- [5] 程磊磊,却晓娥,杨柳,等.中国荒漠生态系统:功能提升、服务增效[J].中国科学院院刊,2020,35(6):690-698.
- [6] Yao Y T, Li Z J, Wang T, et al.A new estimation of China's net ecosystem productivity based on eddy covariance measurements and a model tree ensemble approach[J].Agricultural and Forest Meteorology,2018,253:84-93.
- [7] Zhu X J, Yu G R, He H L, et al.Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: results from upscaling network observations[J].Global and Planetary Change,2014,118:52-61.
- [8] Wang S, Xu L Y, Zhuang Q L, et al.Investigating the spatio-temporal variability of soil organic carbon stocks in different ecosystems of China[J].Science of The Total Environment,2020,758(2):143644.
- [9] Liu R Y, Li, Wang Q X.Variations in water and CO₂ fluxes over a saline desert in western China[J].Hydrological Processes,2011,26(4):513-522.
- [10] Jia X, Zha T S, Wu B, et al.Biophysical controls on net ecosystem CO₂ exchange over a semiarid shrubland in northwest China[J].Biogeosciences,2014,11(3):57-70.
- [11] 杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574.
- [12] Xie J, Zha T S, Jia X, et al.Irregular precipitation events in control of seasonal variations in CO₂ exchange in a cold desert-shrub ecosystem in northwest China[J].Journal of Arid Environments,2015,120(Sep.):33-41.
- [13] 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(4):512-519.
- [14] 田玉强,欧阳华,徐兴良,等.青藏高原土壤有机碳储量与密度分布[J].土壤学报,2008,45(5):933-942.
- [15] Piao S, Fang J, Ciais P, et al.The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J].Nature,2009,458:1009-1013.
- [16] He H, Wang S, Zhang L, et al.Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus[J].National Science Review,2019,6:505-514.
- [17] Fang J Y, Liu G H, Xu S L.Soil carbon pool in China and its global significance[J].Journal of Environmental Sciences,1996(2):249-254.
- [18] 王根绪,程国栋,沈永平.青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义[J].冰川冻土,2002,24(6):693-700.
- [19] Zhao L, Wu X D, Wang Z W, et al.Soil organic carbon and total nitrogen pools in permafrost zones of the Qinghai-Tibetan Plateau[J].Scientific Reports,2018,8(1):3656.
- [20] Ding J Z, Wang T, Piao S L, et al.The paleoclimatic footprint in

- the soil carbon stock of the Tibetan permafrost region[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1–9.
- [21] 姚檀栋, 王伟财, 安宝晟, 等. 1949–2017年青藏高原科学考察研究历程[J]. *地理学报*, 2022, 77(7): 1586–1602.
- [22] 张晓平. 西藏土壤环境背景值的研究[J]. *地理科学*, 1994(1): 49–55.
- [23] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [24] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏地形[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [25] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏植被[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [26] 张新时. 中华人民共和国植被图(1:1000000)[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [28] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [29] 焦翠翠, 于贵瑞, 陈智, 等. 基于遥感反演的1982–2015年中国北方温带和青藏高原高寒草地地上生物量空间数据集[J/OL]. *中国科学数据*, 2019, 4(1).
- [30] Yang Y H, Mohammad A, Feng J Z, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 84(2): 131–141.
- [31] 邱巡巡, 曹广超, 张卓, 等. 高寒农田土壤有机碳和全氮密度垂直分布特征及其与海拔的关系[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3): 623–630.
- [32] 徐华君, 王文欣, 王丹彤. 中天山北坡垂直带土壤有机碳密度分布特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 35–38.
- [33] 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.
- [34] 刘淑娟, 魏兴璐, 郑倩倩, 等. 西藏阿里高寒荒漠区土壤有机碳含量特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(4): 234–240.
- [35] 李超逸. 阿里地区典型植被群落与土壤养分特征研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2021.
- [36] 张亚峰, 姚振, 马强, 等. 青藏高原北缘土壤碳库和碳汇潜力研究[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(2): 206–212.
- [37] 田玉强, 欧阳华, 宋明华, 等. 青藏高原样带高寒生态系统土壤有机碳分布及其影响因子[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2007, 33(4): 443–449.
- [38] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 533–544.
- [39] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687–699.
- [40] 刘慧霞, 董乙强, 崔雨萱, 等. 新疆阿勒泰地区荒漠草地土壤有机碳特征及其环境影响因素分析[J]. *草业学报*, 2021, 30(10): 41–52.
- [41] 金月. 内蒙古西阿拉善荒漠土壤有机碳空间格局[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.
- [42] Nie X Q, Yang L C, Li F, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the alpine shrubland in the Three Rivers Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Catena*, 2019, 178: 154–162.
- [43] 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1298–1305.
- [44] Yang Y H, Fang J Z, Tang Y H, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1592–1599.
- [45] Mu C, Zhang T, Wu Q, et al. Editorial: organic carbon pools in permafrost regions on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(2): 479–486.
- [46] 王栋, 吴晓东, 魏献花, 等. 基于地理加权回归的青藏高原季节冻土区土壤有机碳空间分布研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(3): 1036–1045.
- [47] 马蕾, 金会军. 气候变暖对多年冻土区土壤有机碳库的影响[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 91–103.
- [48] 王艺璇, 仲秋维, 郑昕雨, 等. 冻融循环对土壤性状特征影响研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(10): 231–240.
- [49] 马素辉, 牟翠翠, 郭红, 等. 祁连山黑河上游多年冻土区不同植被类型土壤有机碳密度分布特征[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 426–433.
- [50] 王娇月, 宋长春, 王宪伟, 等. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 442–452.
- [51] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1626–1632.
- [52] 胡雷, 王长庭, 阿的鲁骥, 等. 高寒草甸植物根系生物量及有机碳含量与土壤机械组成的关系[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2015, 41(1): 6–11.

Distribution characteristics of soil organic carbon and its relationship with soil physical properties in Ali Desert Area, Tibetan Plateau

Shi Yaofang^{1,2}, Xue Xian^{1,2}, You Quangang¹, Peng Fei^{1,2}, Huang Cuihua¹

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the soil background data in Ali Desert Area and improve the understanding of the level of soil carbon sink in alpine desert, this article took the 0–100 cm deep soil in Ali Desert Area of Qinghai-Tibet Plateau as the research object. Through field investigation, sample collection, and laboratory experiments of 34 soil samples distributed in the whole region, the vertical and horizontal distribution characteristics of soil organic carbon content (SOC) and soil organic carbon density (SOCD), as well as the relationship with vegetation types and soil physical properties were discussed. The results showed: (1) The average values of SOC and SOCD in the soil depth of 100 cm were $3.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $4.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively, which were at a low level nationwide. In the vertical direction, SOC and SOCD gradually decreased from the surface layer to the deep layer, with the surface aggregation phenomenon. (2) In the whole region, SOC and SOCD showed strong variability and significant differences among different vegetation types ($P \leq 0.05$). In the horizontal direction, SOC and SOCD showed a decreasing trend from northeast to southwest, from the desert steppe, shrubby steppe desert, semi-shrubby and dwarf semi-shrubby desert to the non-vegetation area. (3) The soil bulk density and sand content gradually increased with the increase of soil depth, while soil water content, clay content, and silt content gradually decreased. In some areas with low vegetation coverage, the soil water content and clay content showed a low-high-low trend with soil depth. Soil water content, silt content, and clay content were significantly positively correlated with SOCD ($P \leq 0.05$), and soil sand content was significantly negatively correlated with SOCD ($P \leq 0.05$).

Key words: Ali Desert Area; soil organic carbon content; soil organic carbon density; soil physical properties