

青藏高原色季拉山流石滩表层土壤有机碳的空间变化特征及影响因素

王小姣, 梁万栋, 万丹, 喻武, 杨慧

(西藏农牧学院, 西藏 林芝 860000)

摘要: [目的] 分析青藏高原不同海拔下表层土壤可溶性有机碳(DOC), 易氧化有机碳(ROC)、碳库稳定性及碳储量变化特征研究及土壤有机碳(SOC), DOC 的影响因素, 为后续复杂地形寒区 SOC 的稳定性研究提供科学依据。[方法] 以色季拉山流石滩为研究区, 以单因素方差分析法分析了 4 300~4 700 m 之间不同海拔土壤物理性质, DOC, ROC 以及 SOC 的含量特征, 结合 Pearson 相关分析与冗余分析探讨了 DOC, ROC 与各因子之间的相互关系。[结果] ①土壤容重、密度与海拔呈负相关, 其最大值分别为 1.56, 1.12 g/cm³, 土壤含水率和孔隙度与海拔呈正相关, 其最大值分别为 74.22%, 58.70%; ②SOC 含量随海拔升高呈现先升高后降低趋势, DOC, ROC 随海拔升高而呈现出波动变化趋势; ③海拔 4 400 m 时 DOC/SOC, ROC/SOC 达到最大值, 可溶性有机碳储量(DOCS)和有机碳储量(SOCS)均值分别为 40.779 g/m², 8.105 kg/m², 流石滩土壤碳库稳定性较好; ④DOC 与土壤物理性质不相关, 但与 SOCS 有一定相关性; ROC 则与物理性质和 SOC 及其相关因子均有一定的相关性; 各因子对色季拉山流石滩土壤 DOC 和 ROC 变化的解释贡献率排序大小为: DOCS>土壤孔隙度>ROC/SOC>土壤含水率>SOC>SOCS>DOC/SOC>土壤密度。[结论] 不同海拔流石滩表层土壤 DOC, ROC 与海拔有一定相关性, 且 DOCS, 土壤孔隙度与 ROC/SOC 均是影响 DOC, ROC 含量的重要因子, 同时各因子间存在密切的关系。

关键词: 土壤有机碳; 可溶性有机碳; 易氧化有机碳; 影响因素; 冗余分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0359-08

中图分类号: S714.3

文献参数: 王小姣, 梁万栋, 万丹, 等. 青藏高原色季拉山流石滩表层土壤有机碳的空间变化特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 359-366. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.041; Wang Xiaojiao, Liang Wandong, Wan Dan, et al. Spatial variation characteristics and influencing factors of soil organic carbon in a rocky beach of Sejila Mountain, Tibetan Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 359-366.

Spatial Variation Characteristics and Influencing Factors of Soil Organic Carbon in a Rocky Beach of Sejila Mountain, Tibetan Plateau

Wang Xiaojiao, Liang Wandong, Wan Dan, Yu Wu, Yang Hui

(Xizang Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi, Tibet 680000, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of surface soil soluble organic carbon (DOC), readily oxidized organic carbon (ROC), carbon pool stability, and carbon storage changes, as well as influencing factors of soil organic carbon (SOC) and DOC at different elevations in Tibetan Plateau were analyzed in order to provide a scientific basis for subsequent research on the stability of SOC in cold regions with complex terrain. [Methods] Data were collected from a rocky beach of the Sejila Mountain. One-way ANOVA was used to analyze soil physical properties and DOC, ROC, and SOC content characteristics at altitudes ranging from 4 300 m to 4 700 m. Pearson correlation analysis and redundancy analysis were used to determine the relationship

收稿日期: 2022-06-12

修回日期: 2022-07-31

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“藏东南土壤有机碳高异质性成因与高精度量化研究”(41930754); 西藏农牧学院研究生教育创新计划项目“流石滩地带土壤有机碳载体与组分的垂直地带分异规律”(YJS2021-19)

第一作者: 王小姣(1998—), 女(汉族), 陕西省绥德县人, 硕士研究生, 研究方向为高寒区土壤侵蚀机理及其防治。Email: 1522939022@qq.com。

通信作者: 万丹(1981—), 女(汉族), 四川省内江市人, 博士, 教授, 主要从事高寒区土壤侵蚀机理及其防治研究。Email: wandan9250@126.com。

between DOC, ROC, and influencing factors. [Results] ① Soil bulk density and dry density were negatively correlated with altitude, and their maximum values were 1.56 g/cm^3 and 1.12 g/cm^3 , respectively. Soil water content and porosity were positively correlated with altitude, and the maximum values were 74.22% and 58.70%, respectively. ② SOC content initially increased with increasing altitude and then decreased. DOC and ROC showed fluctuating trends with elevation. ③ DOC/SOC and ROC/SOC reached maximum values at 4 400 m. The average DOC and SOC values were 40.779 kg/m^2 and 8.105 kg/m^2 , respectively. The stability of the soil carbon pool in the rocky beach area was relatively good. ④ DOC had no correlation with soil physical properties, but was correlated with average SOC. ROC was correlated with physical properties, SOC, and its related factors. Each factor was correlated with changes in DOC and ROC in the rocky beach area of the Sejila Mountains. Explanatory contribution rate follow the order of average DOC>soil porosity>ROC/SOC>soil water content>SOC>average SOC>DOC/SOC>soil dry density. [Conclusion] Soil DOC and ROC at different elevations were correlated, and average DOC, soil porosity, and ROC/SOC were important factors affecting the contents of DOC and ROC. There were close relationships among these factors.

Keywords: soil organic carbon; soluble organic carbon; easily oxidized organic carbon; influencing factors; redundancy analysis

全球气候变化是全世界都在关注的重要问题^[1], 气候变化最主要的就是气温变化, 温室效应便是气温变化的产物, 其中 CO_2 对温室效应的贡献最大^[2]。 CO_2 可通过植物光合作用、根系分泌物以及凋落物等途径影响着土壤碳库^[3]。进而使得土壤碳储量变化以及碳库稳定性与全球气候变化进程息息相关。也有众多研究表明, 土壤碳储量及稳定性易受生物、环境以及人为影响, 如赵双等^[4]对草甸草原土壤碳储量进行研究, 证明了真菌对有机碳储量有所影响; 张敏等^[5]对太行山丘陵区核桃林土壤碳储量进行研究, 表明了树龄对有机碳储量有显著影响; 以及张笑蓉等^[6]对皖江经济带土壤碳储量的研究, 揭示了人为活动对碳储量的影响。因此, 开展土壤碳库稳定性及碳储量的研究对于科学评价土壤在应对气候变化中的作用、充分发挥土壤固碳功能具有重要意义。

土壤碳库包括土壤有机碳碳库和土壤无机碳库, 其中土壤有机碳(SOC)作为土壤质量的一个重要指标, 同时也是维持土壤生态系统碳平衡的关键因素^[7-9]。研究表明, SOC并非单一物质, 而是由多种功能性碳组分组成^[10], 依据土壤中的稳定性差异是主要划分不同组分的方法, 可以将土壤有机碳分为活性有机碳和惰性有机碳^[11]。活性有机碳主要用易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)以及微生物生物量碳(MBC)来表征, 其易被矿化分解, 对环境变化的响应更为敏感^[12-13]; 惰性有机碳作为土壤有机碳库的稳定组分, 通过在土壤中长期停留来提高粮食产量与土壤质量^[14-15]。ROC作为活性有机碳的组分, 其在SOC库中更易被溶解、氧化, 故对环境变化更为敏感, 可以有效评价土壤质量变化^[16]; DOC作为活

性有机碳最活跃的组分, 是养分周转的桥梁^[17], 其通过影响土壤淋溶过程进而可以影响土壤碳库及其稳定性^[18]; MBC是SOC中最活跃的分子, 生物酶对其影响较大, 故在海拔较高, 温度较低的流石滩并不适于研究。目前关于有机碳相关的报道主要集中在有机碳含量、组分、时空以及空间分布等方面, 涉及对象更是有森林^[19-20]、农田^[21-22]、草地^[23]以及湿地等^[24]方面, 但是关于流石滩的土壤系统资料仍较为缺乏, 追其原因, 主要还是因为高山流石滩大都分布于人迹罕至的4 000 m以上地带, 为研究带来困难。高山流石滩作为生态脆弱敏感地带, 是青藏高原高山山顶主要地貌, 介乎于冰川与(林线)草线之间^[25], 植被类型以草地为主。处于生物圈与岩石圈的特殊地带, 是具有代表性的典型高寒生态系统之一, 是青藏高原气候变化敏感区域, 在全国甚至全球都具有重要生态地位。因此, 对高山流石滩的研究渐渐得到重视^[26-27]。近年来, 随着全球变暖的加剧, 使得高海拔区域近期升温趋势也在增加^[28]。高山流石滩因其特殊地理位置更是首当其冲受到影响。气候变暖可能会导致高山流石滩季冻土中封存的有机碳释放或以DOC, ROC形式与地表水或者地下水进行交换^[29]。且由于高山流石滩土壤浅薄及稳定性差^[26], 尤其是表层土壤有机碳更易流失, 故在全球变化大背景下, 高山流石滩土壤的研究意义重大。因此本研究试图在生态脆弱敏感地带的流石滩区域, 开展不同海拔下表层土壤DOC, ROC、碳库稳定性及碳储量变化特征研究及土壤SOC, DOC的影响因素分析, 旨在为后续复杂地形寒区SOC的稳定性研究提供一定的科学理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于藏东南色季拉山,地处藏东南雅鲁藏布江大峡谷西北侧,喜马拉雅山脉东部属念青唐古拉山脉,地理坐标 29.10°—30.15°N, 93.12°—95.35°E, 海拔 4 700 m。主要受到暖季风影响,使得研究区气候具有冬温夏凉、干湿季分明的特点,冬春少雨,夏秋雨丰^[30],年均降水量在 650~1 134 mm,蒸发量 554 mm,年空气平均相对湿度 60%~80%,以山地棕壤和酸性棕壤为主。流石滩则位于色季拉山海拔 4 300~4 700 m,在 4 300 m,4 400 m 两个海拔主要植被为灌木及草甸,4 500~4 700 m 主要植被类型为草甸,具体情况如表 1 所示。

表 1 流石滩植被信息

Table 1 Vegetation information on flowstone beaches

海拔/ m	经纬度	平均 盖度/%	群落 优势种
4 300	94.62916083 E, 29.62336267 N	67	雪山杜鹃
4 400	94.62332983 E, 29.63680517 N	89	珠芽蓼
4 500	94.61943600 E, 29.63996767 N	95	圆穗蓼
4 600	94.65115867 E, 29.61478267 N	75	嵩草
4 700	94.65215567 E, 29.61433417 N	70	嵩草

1.2 试验设计

试验于 2021 年 8 月中旬进行,共选取 5 个海拔,即在色季拉山海拔 4 300—4 700 m 范围选择典型具有代表性样点,记录其海拔、地理坐标,后采集土壤土样,按照典型选样方法,每 100 m 一个梯度,沿不同海拔梯度分别选取样点,为保证样点具有典型性,各样点间坡向、坡位等因素均一致,每个样点按照五点法设置,采集 0—15 cm 表土层环刀(100 cm³)土 3 个和原状土 1 kg,环刀土带回实验室,用于测定土壤容重、含水率、孔隙度以及干湿密度;原状土则带回实验室将各个样地的土样剔除杂草、植物根系和碎石等杂质,用于土壤团聚体状况、有机质以及土壤组分。

1.3 指标测定与计算方法

土壤容重采用环刀法测定^[31],土壤孔隙度、含水量、密度采用环刀法和浸水法测定^[32];土壤团聚体采用干筛法;(SOM)采用重铬酸钾—外加热法测定^[33];ROC 含量采用 KMnO₄ 氧化比色法测定^[34];DOC 采用去离子水浸提法测定^[35];DOCS, SOCS 以及 RIC 可通过计算得出^[36]。

土壤物部分理化性质计算公式为:

$$\text{土壤容重}(X_0) = \frac{\text{干土重}(g)}{\text{体积}/\text{cm}^3} = \frac{g \times 100}{V \times (100 + W)} \quad (1)$$

$$\text{土壤含水量}(X_1) = \frac{\text{原土质量} - \text{烘干质量}}{\text{烘干土质量}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: g 表示环刀内湿样重; V 表示环刀内容积; W 表示样品内含水百分数(g/cm^3)。

$$\text{土壤孔隙度 } X_2 = \left(1 - \frac{X_0}{\text{土壤比重}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{团聚体质量分数}(X) = \frac{M_i}{M_T} \times 100\% \quad (4)$$

式中:土壤比重取其平均值 2.65 g/cm^3 ; X_0 表示土壤容重; M_i 为直径 i mm 水稳性团聚体质量(g); M_T 为团聚体总质量(g)。

土壤有机碳及相关指标计算公式为:

$$\text{DOCS} = \sum(\text{DOC} \times \text{BD} \times 0.15 \text{ m}) \quad (5)$$

$$\text{SOCS} = \sum(\text{SOC} \times \text{BD} \times 0.15 \text{ m}) \quad (6)$$

$$\text{RIC} = 1 - \text{DOCS}/\text{SOCS} \quad (7)$$

$$\alpha = \text{DOC}/\text{SOC} \quad (8)$$

$$\beta = \text{ROC}/\text{SOC} \quad (9)$$

式中:DOCS 为 DOC 储量(g/m^2); SOCS 为 SOC 储量(g/m^2); DOC 表示表层土壤 DOC 含量(mg/kg); SOC 为表层土壤 SOC 含量(mg/kg), 0.15 m 为土层厚度(m); RIC 为表层土壤碳库稳定性,表层土壤碳库稳定性 RIC 的取值范围为 0~1, RIC 值越接近 1, 表示土壤碳库越稳定; α 为可溶性有机碳(DOC)在土壤有机碳(SOC)的占比; β 为易氧化有机碳(ROC)在土壤有机碳(SOC)的比例^[18]。

1.4 数据处理与统计方法

对本研究的数据首先采用 Excel 2016 进行整理,其次通过 SPSS 23.0 软件进行基本统计学分析,以及 Canoco 5.0 和 Origin 2022b 进行作图。主要采用 SPSS 23.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA) LSD 法多重比较检验不同处理间差异显著性($p < 0.05$)以及逐步回归分析;主要采用 Origin 2022b 进行 Pearson 相关分析法进行双尾检验确定显著性;主要采用 Canoco 5.0 进行冗余分析确定因子解释量。

2 结果与分析

2.1 流石滩土壤部分物理性质空间分布特征

由表 2 可知,土壤容重的平均值变化范围为 1.09~1.56 g/cm^3 ,且与海拔大体呈负相关,即随着海拔升高土壤容重呈减小趋势,这是因为随着海拔的升高,冻融侵蚀加剧,且在山顶达到最大值,故土壤由紧实逐渐转变为松散,容重逐渐减小;土壤含水率的平均值变化范围为 40.39%~74.22%,土壤孔隙度的平均值变化范围为 41.24%~58.70%,且均与海拔呈正相关,即随着海拔升高土壤含水率与土壤孔隙度均呈

增大趋势,这是因为松散的土壤,土壤潜在肥力较高,孔隙变大^[37];土壤密度的平均值变化范围为 0.67~1.12 g/cm³,且与海拔呈负相关,即随着海拔升高土壤密度呈减小趋势,这是土壤密度与土壤矿物组成和有机质组成有关,大团聚体(>0.25 mm)质量百分数的平均值变化范围为 75.93%~90.72%,且与海拔大体

呈正相关,即随着海拔升高,大团聚体(>0.25 mm)质量百分数呈增加趋势;小团聚体(<0.25 mm)质量百分数的平均值变化范围为 9.28%~24.08%,且与海拔呈负相关,即随着海拔升高,小团聚体(<0.25 mm)质量百分数呈减小趋势,这是因为团聚体作为土壤结构的基本组成单元,与土壤质量息息相关。

表 2 不同海拔土壤的物理性质指标

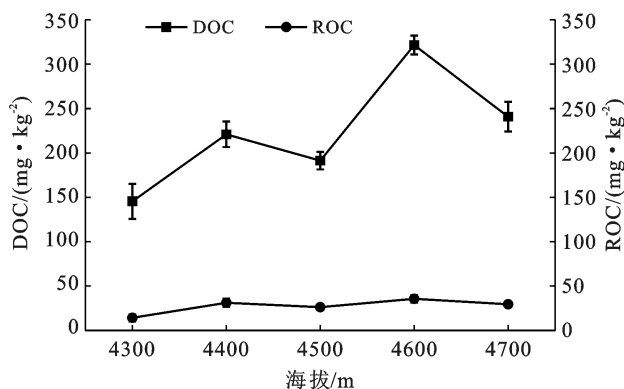
Table 2 Physical property indicators of soils at different altitudes

海拔高度/m	容重/(g·cm ⁻³)	含水率/%	孔隙度/%	密度/(g·cm ⁻³)	大团聚体质量百分数/%	小团聚体质量百分数/%
4 300	1.56±0.10 ^a	40.39±9.62 ^b	41.24±3.95 ^b	1.12±0.15 ^a	81.54±4.39 ^{ab}	18.46±4.39 ^{ab}
4 400	1.21±0.02 ^b	49.87±1.48 ^b	54.17±0.59 ^a	0.81±0.00 ^b	75.93±5.34 ^b	24.08±5.34 ^a
4 500	1.21±0.01 ^b	49.51±1.43 ^b	54.22±0.43 ^a	0.82±0.00 ^b	84.73±1.00 ^{ab}	15.27±1.00 ^{ab}
4 600	1.09±0.12 ^b	57.82±2.66 ^{ab}	58.7±4.56 ^a	0.70±0.07 ^b	86.44±1.38 ^{ab}	13.56±1.38 ^{ab}
4 700	1.16±0.03 ^b	74.22±2.02 ^a	56.26±1.06 ^a	0.67±0.01 ^b	90.72±1.53 ^a	9.28±1.53 ^b

注:同列数据后不同小写字母表示不同海拔间差异性显著($p < 0.05$)。

2.2 流石滩土壤 DOC, ROC 空间分布特征

由图 1 可知,DOC 与 ROC 与海拔有一定的相关性,即均随海拔升高而呈现出波动变化趋势且 DOC 与 ROC 均在 4 600 m 达到最大值,分别为 422.16 mg/kg, 38.67 mg/kg,二者随海拔的变化均表现为 4 600 m>4 400 m>4 700 m>4 500 m>4 300 m。DOC 含量的变化范围 55.69~422.16 mg/kg, ROC 含量的变化范围 8.29~38.67 mg/kg。



注:DOC 为可溶性有机碳;ROC 为易氧化有机碳。下同。

图 1 流石滩土壤可溶性有机碳(DOC)和易氧化有机碳(ROC)的空间分布特点

Fig.1 Spatial distribution characteristics of dissolved organic carbon(DOC) and readily oxidizable carbon(ROC) in flowstone beaches

由表 3 可知,SOC 与海拔具有一定的相关性,即 SOC 随着海拔高度的变化而变化,具体表现 4 600 m>4 700 m>4 500 m>4 400 m>4 300 m,即在 4 600 m 达到最大值 69.534 g/kg;4 400 m 海拔土壤 α

和 β 值明显高于其他海拔,土壤 α 值随海拔具体表现为在 4 400 m 达到最大值 0.621%,变化趋势是 4 400 m>4 600 m>4 500 m>4 700 m>4 300 m;土壤 β 值随海拔具体表现为在 4 400 m 达到最大值 0.086%,变化趋势为 4 400 m>4 500 m>4 700 m>4 600 m>4 300 m。

表 3 土壤有机碳及 DOC, ROC 在总有机碳中的比例(α, β)

Table 3 Proportion of soil organic carbon and dissolved organic carbon (DOC, α) and readily oxidizable carbon (ROC, β) in total organic carbon

海拔/m	SOC/(g·kg ⁻¹)	α 值	β 值
4 300	29.729±5.10 ^b	0.440±0.116	0.048±0.000 ^b
4 400	36.096±2.55 ^{ab}	0.621±0.555	0.086±0.006 ^a
4 500	41.122±2.27 ^{ab}	0.470±0.036	0.065±0.006 ^{ab}
4 600	69.534±5.31 ^a	0.508±0.242	0.054±0.005 ^b
4 700	49.200±0.51 ^{ab}	0.488±0.085	0.060±0.005 ^{ab}

注: α 为 DOC/SOC, β 为 ROC/SOC。

2.3 DOC, ROC 在总有机碳比例及表层土壤碳储量、碳库稳定性分析

由表 4 可知,流石滩表层土壤 DOCS 与 SOCS 差异较大,其分布范围分别在 13.882~76.961 g/m², 4.281~12.091 kg/m² 之间,平均值分别为 40.779 g/m², 8.105 kg/m²。RIC 范围在 0.992~0.997 之间,平均值为 0.995。从各指标变异系数来看,DOCS 的变异系数最大,RIC 在各海拔间均接近 1,由上述土壤有机碳及其相关指标可知,流石滩表层土壤碳库性极为稳定。

表 4 流石滩表层土壤的 DOC, SOC 储量、碳库稳定性 (RIC) 的特征

Table 4 dissolved organic carbon (DOC), soil organic carbon (SOC) storage and carbon pool stability characteristics of surface soil of flowstone beach

指标	DOCS/ (g · m ⁻²)	SOCS/ (kg · m ⁻²)	RIC
最小值 (min)	13.882	4.281	0.992
最大值 (max)	76.961	12.091	0.997
平均值 (mean)	40.779	8.105	0.995
标准差 (SD)	16.354	2.264	0.002
变异系数 (CV)/%	40.104	27.933	0.201

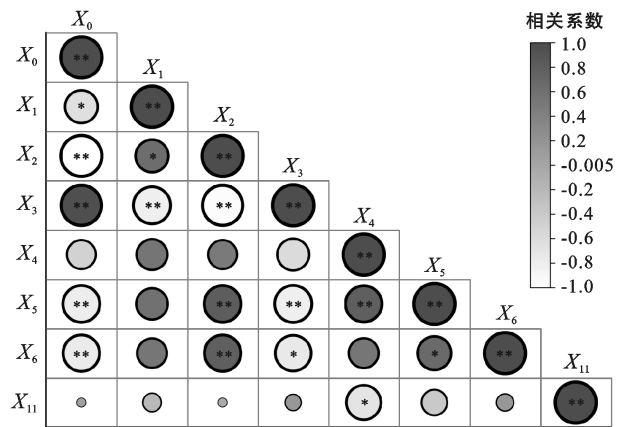
注: DOCS 为可溶性有机碳储量; SOC 为土壤有机碳储量; RIC 为土壤碳库稳定性。下同。

2.4 流石滩土壤的有机碳组分影响因子分析

为研究色季拉山流石滩土壤的 ROC 与 DOC 与各因子的相互影响程度, 现剔除一些相关性很强的指标, 对其余指标进行相关性分析。由图 2 可知, DOC 与土壤容重以及密度呈负相关, 但 DOC 与土壤理化性质均不显著 ($p > 0.05$), 仅与 RIC 显著相关 ($p < 0.01$); ROC 与土壤容重以及密度呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 同时与 SOC 以及 DOC 呈显著正相关 ($p < 0.05$), 这说明土壤容重与密度越小, 土壤孔隙度、SOC 以及 DOC 越大, ROC 也越大。同时, 从色季拉山流石滩土壤碳储量与各因子之间相互影响的相关性可知, RIC 则与 DOC 呈显著负相关 ($p < 0.05$)。这说明土壤碳库稳定性主要取决于可溶性有机碳及其相关因子。

由于 Pearson 相关分析法并不能确定各因子间是否有共线性, 故本文采用逐步回归分析法来判断各因子间是否有共线性, 结果见表 5。根据对 DOC 的逐步回归分析可知, 输入变量为 RIC 和 SOC, 且二者显著性均小于 0.01, 共线性 VIF 也均小于 10, 可认为这两变量共线性较小, 结果较为理想, 逐步回归方程

为: $DOC = 49\ 358.67 - 49\ 547 \times RIC + 3.588 \times SOC$; 根据对 DOC 的逐步回归分析可知, 输入变量为土壤密度, 显著性小于 0.01, 共线性也小于 10, 可认为此变量共线性较小, 结果较为理想, 逐步回归方程为: $ROC = 59.156 + 38.576 \times \text{土壤密度}$ 。



注: X_0 表示容重, X_1 表示含水率, X_2 表示孔隙度, X_3 表示土壤密度, X_4 表示 DOC, X_5 表示 ROC, X_6 表示 SOC, X_7 表示 DOC/SOC, X_8 表示 ROC/SOC, X_9 表示 DOCS, X_{10} 表示 SOCS, X_{11} 表示 RIC(下同)。* * 在 0.01 水平(双侧)上极显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

图 2 流石滩土壤的 DOC 和 ROC 与各因子间的相关性

Fig.2 Correlation between dissolved organic carbon (DOC) and readily oxidizable carbon (ROC) and various factors in flowstone beach soil

综上所述, 从 DOC, ROC 与各因子间的相关性分析结果中, 仅可得出彼此间存在简单的相关关系, 而缺乏较为详细的定量描述, 而为了更好的研究各因子对流石滩土壤的 DOC 与 ROC 解释程度, 避免因仅用简单分析得出的相关性而引起错误判读, 故对流石滩土壤的有机碳组分与各因子进行冗余分析, 从而对 DOC, ROC 与各因子间的关系进行定量描述。

表 5 流石滩表层土壤的 DOC, SOC 的逐步回归分析

Table 5 Stepwise regression analysis of dissolved organic carbon (DOC) and soil organic carbon (SOC) of surface soil of flowstone beach

DOC 的逐步回归分析				ROC 的逐步回归分析			
指标	B	显著性 p 值	VIF	指标	B	显著性 p 值	VIF
常量	49 358.67	0		常量	59.156	0	
RIC	-49 547	0	1.032	土壤密度	38.576	0.004	1
SOC	3.588	0	1.032				

注: VIF 为共线性。

由图 3 可知, 土壤含水率、孔隙度、密度、SOC, DOC/SOC, ROC/SOC, SOCS, DOCS 能很好地解释

DOC 的变化, 其中, 土壤含水率、孔隙度、SOC, DOC/SOC, SOCS, DOCS 与 DOC 呈正相关, 而土壤密度、

ROC/SOC 与 DOC 呈负相关;土壤含水率、孔隙度、密度、SOC, DOC/SOC, SOCS, DOCS 能很好地解释 ROC 的变化,其中,土壤含水率、孔隙度、SOC, DOC/SOC, SOCS, DOCS 与 ROC 呈正相关,而土壤密度与 ROC 呈负相关。总体上,各因子对色季拉山流石滩土壤 DOC 和 ROC 变化的解释贡献率排序大小为: DOCS>土壤孔隙度>ROC/SOC>土壤含水率>SOC>SOCS>DOC/SOC>土壤密度,其中 DOCS、土壤孔隙度与 ROC/SOC 占因子总解释量的 75.5%,而土壤容重和 RIC 并不能解释 DOC 与 ROC,故未出现在图中。

3 讨论与结论

3.1 讨论

土壤物理性质是衡量土壤质量一种重要方式,其主要包括容重、含水率等^[38],海拔往往通过影响温度、降水等来影响土壤性质^[39]。本研究过程中发现土壤容重与海拔呈负相关,即随着海拔升高土壤容重呈减小趋势,土壤含水率与土壤孔隙度与海拔呈正相关,即随着海拔升高土壤含水率与土壤孔隙度均呈增大趋势,说明随着海拔的升高,冻融侵蚀加剧,且在山顶达到最大值,故土壤由紧实逐渐转变为松散,容重逐渐减小,故呈现出此结果,这与以往大多数研究结果相符^[38,40]。同时大团聚体质量百分数与海拔呈正相关,小团聚体质量百分数与海拔呈负相关的这一结论也恰恰验证了这一观点。

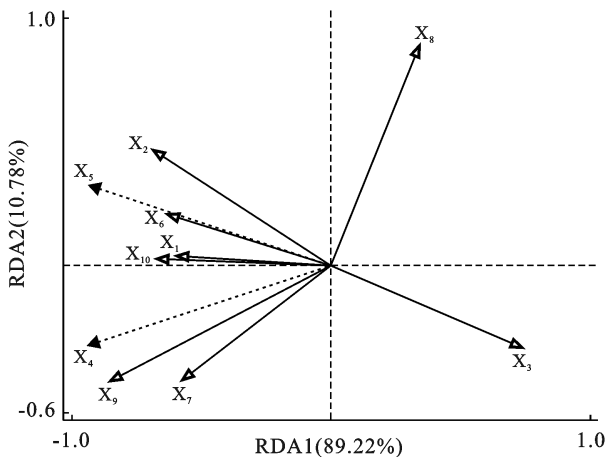


图 3 流石滩土壤的 DOC 和 ROC 与各因子间冗余分析结果

Fig.3 Dissolved organic carbon (DOC), readily oxidizable carbon (ROC) and redundancy analysis results between factors in flowstone beach soil

SOC 可提供土壤养分,改善土壤结构,是决定土壤质量的重要指标^[41]。本研究发现在海拔 4 300~4 600 m 时 SOC 与海拔呈正相关,即在海拔 4 600 m

时 SOC 达到最大值,这与陈曦等^[42]人研究结论相符,而在 4 700 m 时 SOC 含量有所下降,这可能与山顶植被减少,大量土壤裸露,致使冻融侵蚀加剧,导致有机碳流失有关,而在祁连山^[43]、戴云山^[44]以及江西官山常绿阔叶林^[45]虽也均出现了 SOC 含量随海拔升高呈现先升高后降低的变化,但这可能与随着海拔增加林分密度减小有关,与冻融并无关系。土壤 DOC 含量主要来源有两个方面,一方面是有机质直接溶解,另一方面是土壤微生物生命活动^[46],ROC 则主要受到植被凋落物以及根系分泌物影响^[47]。本研究过程中发现,DOC 含量与海拔无明显关系,这与刘雅洁等^[48]人研究结论相符,而 ROC 与 DOC 含量变化相一致,而周炎等^[49]人研究也表明了 ROC 与 DOC 含量变化趋势一致。

有研究表明,可溶性有机碳(DOC)在土壤有机碳(SOC)的占比,与土壤有机碳的稳定性及淋溶情况有关,其值越大,则土壤有机碳的活性越大,被淋溶、风蚀的强度越大^[50];而易氧化有机碳(ROC)在土壤有机碳(SOC)的占比可反应土壤活性,其值越大,则土壤碳活性越大,稳定性越差^[51]。本文中 α (DOC/SOC)和 β (ROC/SOC)与海拔并没有明显相关性,这与秦纪洪等^[52]对川西亚高山—高山土壤表层活性有机碳比例,以及加鹏华等^[53]对太行山的研究结论相同。

土壤活性有机碳作为土壤养分迁移的重要载体^[54],常随总有机碳含量变化而变化^[55]。本研究通过对活性有机碳和土壤因子进行相关性研究发现 ROC 与土壤容重、孔隙度以及土壤 DOC 存在极显著关系,与 SOC, SOCS, DOCS 存在显著性关系,而 ROC 与 DOC 存在极显著正相关,这是由于各活性有机碳组分之间关系密切,共同影响土壤中有有机碳的周转与功能发挥,这也与刘雅洁等^[48]人研究结论相符。冗余分析结果表明 DOC 和 ROC 可被不同因子较好解释,DOC, ROC 与含水率呈正相关,这与黄斌等^[56]研究结果大致相同。

3.2 结论

(1) 土壤容重、含水率、孔隙度以及密度的各海拔平均值变化范围分别为 1.09~1.56 g/cm³, 40.39%~74.22%, 41.24%~58.70%以及 0.67~1.12 g/cm³,其中土壤容重、密度与海拔呈负相关,土壤含水率和孔隙度与海拔呈正相关。

(2) SOC 含量随海拔升高呈现先升高后降低趋势,DOC, ROC 与海拔有一定的相关性,表现为随海拔升高而呈现出波动变化趋势,且在 4 600 m 达到最大值。其含量的变化范围分别为 55.69~422.16 mg/kg,

8.29 ~ 38.67 mg/kg; DOC/SOC 与 ROC/SOC 均在 4 400 m 达到最大值。

(3) DOCS 平均值为 40.779 g/m², SOCS 平均值为 8.105 kg/m², RIC 均值为 0.995, 可见流石滩土壤碳库稳定性较好。

(4) 从 DOC, ROC 与因子相关性分析以及逐步回归分析来看, DOC 与物理性质不相关, 但与 RIC, SOC 有一定相关性; ROC 则与物理性质和 SOC 及其相关因子均有一定的相关性; 从 DOC, ROC 与因子之间进行冗余分析来看, 各因子对色季拉山流石滩土壤 DOC 和 ROC 变化的解释贡献率排序大小为: DOCS > 土壤孔隙度 > ROC/SOC > 土壤含水率 > SOC > SOCS > DOC/SOC > 土壤密度, 其中 DOCS, 土壤孔隙度与 ROC/SOC 占因子总解释量的 75.5%。

[参 考 文 献]

- [1] 王开存, 王灿, 李龙辉, 等. 全球变化驱动下陆表自然和人文要素相互作用及区域表现[J]. 中国基础科学, 2017, 19(5): 23-28.
- [2] 龚元. 长叶松(*Pinus palustris*) 生态系统碳物候动态和建模方法研究[D]. 江苏 南京: 南京林业大学, 2021.
- [3] 房蕊, 于镇华, 李彦生, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对农田土壤碳库及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3666-3679.
- [4] 赵双, 张涛, 石连旋, 等. 模拟增温和施氮条件下丛枝菌根真菌对草甸草原土壤团聚体稳定性和土壤碳储量的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(9): 97-106.
- [5] 张敏, 王明伟, 刘欣宇, 等. 太行山丘陵区不同林龄核桃树固碳释氧量及冠下土壤碳储量[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(1): 93-98.
- [6] 张笑蓉, 陈富荣, 邢润华, 等. 皖江经济带土壤碳储量与有机碳密度空间分布特征研究[J]. 安徽地质, 2021, 31(4): 340-343.
- [7] Dungait J, Hopkins D, Gregory A, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. Global Change Biology, 2012, 18(6): 1781-1796.
- [8] 张久明, 匡恩俊, 刘亦丹, 等. 有机肥替代不同比例化肥对土壤有机碳组分的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(12): 1534-1540.
- [9] 吴海梅, 周彦莉, 郑浩飞, 等. 秸秆带状覆盖对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 61-69.
- [10] 周伟, 吴红慧, 张运龙, 等. 土壤活性有机碳测定方法的改良[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 70-75.
- [11] 张方方, 岳善超, 李世清. 土壤有机碳组分化学测定方法及碳指数研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 252-259.
- [12] 宋凯悦, 尹云锋, 马亚培, 等. 氮沉降背景下生物炭施用对土壤有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 247-254.
- [13] 杨长明, 陈霞智, 张一夔, 等. 土地利用与覆被变化对巢湖湖滨带土壤有机碳组分及酶活性的影响[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1766-1776.
- [14] Datta A, Basak N, Chaudhari S K, et al. Soil properties and organic carbon distribution under different land uses in reclaimed sodic soils of North-West India [J]. Geoderma Regional, 2015(4): 134-146.
- [15] Ghosh A, Bhattacharyya R, Meena M C, et al. Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an Inceptisol [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 177: 134-144.
- [16] 赵志忠, 李燕, 赵泽阳, 等. 海南岛东部地区土地利用方式对土壤有机碳与易氧化有机碳的影响[J]. 热带地理, 2019, 39(1): 144-152.
- [17] 廖李容. 氮添加对白羊草土壤有机碳组分及根系分泌物的影响[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2021.
- [18] 刘华兵, 李谦维, 高俊琴, 等. 红碱淖湿地不同水分条件下芦苇群落对土壤有机碳组分和无机氮含量的影响[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 88-94.
- [19] 牟凌, 张丽, 陈子豪, 等. 四川盆地西缘 4 种人工林土壤有机碳组分特征[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(3): 121-126.
- [20] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 406-413.
- [21] 秦焱鹤, 李雪利, 王静, 等. 施肥对植烟土壤有机碳组分及土壤呼吸的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 885-894.
- [22] 连玉珍, 曹丽花, 刘合满, 等. 色季拉山西坡表层土壤有机碳的小尺度空间分布特征[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(9): 70-79.
- [23] 叶成龙, 张浩, 周小龙, 等. 氮添加对高寒草甸土壤微生物呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2279-2287.
- [24] 王经波, 郑利林, 郭宇菲, 等. 鄱阳湖湿地土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 915-926.
- [25] 邓敏, 周浙昆. 滇西北高山流石滩植物多样性[J]. 云南植物研究, 2004, 26(1): 23-34.
- [26] 杨沛芳, 树雪花, 陈捷, 等. 白马雪山国家级自然保护区高山流石滩植物资源调查研究[J]. 林业调查规划, 2021, 46(4): 140-143.
- [27] 邢艳兰. 玉龙雪山流石滩上的“植物明星”[J]. 科学大众(小学版), 2021(S2): 43-45.
- [28] Li Li, Yang Shu, Wang Zhi, et al. Evidence of Warming and Wetting Climate over the Qinghai-Tibet

- Plateau [J]. *Arctic Antarctic & Alpine Research*, 2010, 42(4): 449-457.
- [29] 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.
- [30] 杨红, 扶胜兰, 刘合满, 等. 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤碳氮分布特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(10): 15-23.
- [31] 周伟, 张运龙, 徐明岗, 等. 长期撂荒对黑土土壤有机碳组分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 11-18.
- [32] 张鹏, 李小熊, 姚甜甜, 等. 藏东横断山区业拉山背风坡土壤理化性质垂直地带性分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(8): 111-118.
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [34] 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活性碳组分的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(2): 661-668.
- [35] Liang B C, MacKenzie A F, Schnitzer M, et al. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 26(2): 88-94.
- [36] 蒋腊梅, 杨晓东, 杨建军, 等. 不同管理模式对干旱区草地土壤有机碳氮库的影响及其影响因素探究[J]. *草业学报*, 2018, 27(12): 22-33.
- [37] 马和平, 赵垦田, 杨小林, 等. 拉萨半干旱河谷人工杨树纯林生态增益研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(32): 18204-18207.
- [38] 姚甜甜, 张鹏, 万丹, 等. 藏东南色季拉山迎风坡土壤物理性质垂直梯度差异性分析[J]. *北方园艺*, 2019(24): 94-102.
- [39] 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性[J]. *生态学报*, 2013, 33(22): 7211-7220.
- [40] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 托木尔峰国家级自然保护区台兰河上游不同海拔草地土壤持水能力研究[J]. *草地学报*, 2017, 25(5): 966-972.
- [41] 张盟, 翟振, 梁太波, 等. 河南烟区土壤有机碳组分特征及其对烟叶化学成分的影响[J]. *烟草科技*, 2022, 55(1): 17-24.
- [42] 陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 等. 秦岭太白山森林表层土壤有机碳分布特征[J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(3): 244-252.
- [43] 张鹏, 张涛, 陈年来. 祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 518-524.
- [44] 吴玥, 赵盼盼, 林开森, 等. 戴云山黄山松林土壤碳组分的海拔变化特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5761-5770.
- [45] 习丹, 余泽平, 熊勇, 等. 江西官山常绿阔叶林土壤有机碳组分沿海拔的变化[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3349-3356.
- [46] Carrillo-Gonzalez R, Gonzalez-Chavez M C A, Aitkenhead-Peterson J A, et al. Extractable DOC and DON from a dry-land long-term rotation and cropping system in Texas, USA [J]. *Geoderma*, 2013, 197/198: 79-86.
- [47] 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 等. 中亚热带土地利用方式对土壤易氧化有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *环境学报*, 2016, 25(6): 911-919.
- [48] 刘雅洁, 王亮, 樊伟, 等. 海拔对杉木人工林土壤活性有机碳组分的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(8): 59-69.
- [49] 周焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔土壤水溶性有机碳的含量特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(4): 48-52.
- [50] 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等. 清澜港红树林湿地典型群落类型沉积物活性有机碳组分分布特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(11): 4572-4581.
- [51] 许慧, BUI Van Thang, 范洪旺, 等. 城市和郊区麻栎林土壤有机碳组分及管理指数变化特征[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(2): 369-376.
- [52] 秦纪洪, 王琴, 孙辉. 川西亚高山—高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5858-5864.
- [53] 加鹏华, 李春雨, 尹海魁, 等. 太行山区不同海拔梯度土壤有机碳库及组分变化特征[J]. *林业与生态科学*, 2021, 36(3): 269-276.
- [54] Soussana J F, Lemaire G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 190: 9-17.
- [55] 杨瑞红, 王新军. 伊犁河谷山地北坡土壤特性及植被群落多样性垂直分布格局[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 32-39.
- [56] 黄斌, 王泉泉, 李定强, 等. 南岭山地土壤有机碳及组分海拔梯度变化特征[J]. *土壤通报*, 2022, 53(2): 374-383.