

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0007

ZHANG Chaofei, MA Suping, HE Xiaobo, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in Buqu catchment in the source region of the Yangtze River, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1):233-242. [张超飞, 马素萍, 何晓波, 等. 长江源区布曲流域土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1):233-242.]

# 长江源区布曲流域土壤有机碳分布特征 及其影响因素

张超飞<sup>1,2</sup>, 马素萍<sup>1</sup>, 何晓波<sup>3,4</sup>, 汪少勇<sup>3,5</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 甘肃省油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 5. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

**摘 要:** 基于长江源区布曲流域 23 个采样点的 138 个土壤样品, 分析了土壤有机碳的分布特征, 并探讨 1 m 以内土壤有机碳含量的影响因素。结果表明, 长江源区布曲流域 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 和 50~100 cm 的 6 层土壤有机碳含量的平均值±标准差分别为 (10.23±4.84) g·kg<sup>-1</sup>、(10.18±5.19) g·kg<sup>-1</sup>、(9.34±5.20) g·kg<sup>-1</sup>、(9.04±4.41) g·kg<sup>-1</sup>、(8.01±4.74) g·kg<sup>-1</sup>、(9.40±4.67) g·kg<sup>-1</sup>, 其随土壤深度增加而降低 ( $R^2=0.511$ )。研究区土壤有机碳含量与海拔并非线性相关 ( $P>0.05$ ), 而是在 4 700~5 100 m 的海拔范围内, 随海拔的升高而增加, 然后在 5 000~5 100 m 海拔处达到最大值后降低。土壤有机碳含量与 pH 值呈现极显著的负相关 ( $P<0.01$ ), 与碳氮比呈现极显著的正相关 ( $P<0.01$ ), 与体积含水量呈现显著的正相关关系 ( $P<0.05$ ), 而与年均气温、年均降水量、全氮、全磷、全钾、无机碳含量、阳离子交换量、容重和黏粒含量的相关性不显著 ( $P>0.05$ ), 表明长江源区布曲流域 1 m 以内土壤有机碳含量的主要相关因素是土壤的 pH 值、碳氮比和体积含水量。研究结果可以为长江源区布曲流域土壤碳循环的研究提供基础数据和科学依据。

**关键词:** 长江源区; 布曲流域; 多年冻土; 有机碳; 影响因素

**中图分类号:** P593 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)01-0233-10

## 0 引言

多年冻土是冰冻圈的重要组成部分, 其是指温度低于 0 °C 时至少连续保存两年的岩土层<sup>[1]</sup>。多年冻土对气候变化的响应极为敏感<sup>[2]</sup>。在全球气候变暖的大背景下, 目前多年冻土正在发生显著、快速和广泛的退化, 主要表现有多年冻土面积减少和活动层厚度增加<sup>[3]</sup>, 导致多年冻土区生物地球化学循环发生改变<sup>[4]</sup>, 进而产生了一系列生态、水文和环境问题<sup>[5-6]</sup>。多年冻土退化会导致多年冻土区土壤中的大量有机碳分解释放, 其通常以温室气体 (如 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>) 的形式进入大气圈<sup>[7]</sup>, 或以溶解性有机碳

(dissolved organic carbon, DOC) 的形式进入水圈<sup>[8]</sup>, 进而对气候变暖产生强烈的正反馈<sup>[9]</sup>。

青藏高原是全球中低纬度高海拔冰冻圈分布的典型区, 被称为世界的“第三极”<sup>[10]</sup>, 其多年冻土主要分布在 4 000~5 500 m 的海拔范围内, 多年冻土实际分布面积约为 115.02×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup><sup>[11]</sup>。目前青藏高原土壤在研究方法、尺度和深度上具有较大差异, 这造成了对青藏高原多年冻土区土壤有机碳储量估算结果存在较大差异<sup>[12]</sup>。Mu 等<sup>[13]</sup>评估青藏高原多年冻土区 0~25 m 深度土壤有机碳储量为 (132±77) Pg, Zhao 等<sup>[14]</sup>评估青藏高原多年冻土区 2 m 以

收稿日期: 2021-09-09; 修订日期: 2021-11-21

基金项目: 三江源国家公园联合研究专项 (LHZX-2020-11-1; LHZX-2020-10-1); 中国水科院科研专项 (HY110145B0012021); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题项目 (SKLCS-ZZ-2022) 资助

作者简介: 张超飞, 硕士研究生, 主要从事多年冻土碳循环研究. E-mail: zhang\_cf151922@163.com

通信作者: 马素萍, 副研究员, 主要从事沉积地球化学研究. E-mail: spma@lzb.ac.cn

内的土壤有机碳储量为 17.07 Pg, Ding 等<sup>[15]</sup>评估青藏高原多年冻土区 3 m 以内的土壤有机碳储量为 34.2~38.9 Pg, Wang 等<sup>[16]</sup>评估青藏高原多年冻土区土壤总有机碳储量为 35.78~69.02 Pg, Wang 等<sup>[17]</sup>评估青藏高原多年冻土区 3 m 以内的土壤有机碳储量为 21.69 Pg。从这些结果可以看出, 青藏高原多年冻土区土壤碳储量巨大, 但是不确定范围较大<sup>[18]</sup>。

长江源区位于青藏高原腹地, 是对全球气候变暖响应最为敏感的区域之一<sup>[19]</sup>, 布曲流域是长江南源当曲流域内一条典型的多年冻土流域, 受全球气候变暖的影响十分明显, 由于其高海拔的地理位置和恶劣的气候条件, 样品和数据获取难度较大, 关于布曲流域土壤有机碳的研究相对匮乏。本研究通过在布曲流域实地挖取多年冻土剖面, 进行土壤样品的采集, 进而分析土壤有机碳的分布特征, 在一定程度上弥补了布曲流域土壤有机碳数据的不足, 为布曲流域多年冻土区土壤有机碳储量的估算和模拟提供基础数据。此外, 探讨了布曲流域土壤有机碳的影响因素, 以期为认识区域上多年冻土区碳循环及其对气候变暖的响应和反馈提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区(91°24'~92°20' E, 32°49'~33°38' N)位于长江源区的布曲流域(图 1), 该流域位于重要气候分界线的唐古拉山脉中段, 流域面积为 4 504.72 km<sup>2</sup>, 海拔处于 4 703~6 081 m 之间, 平均海拔为 5 152 m。气候寒冷干燥, 空气稀薄, 属于典型的高原亚寒带半干旱气候, 多年平均气温为 -6.0 °C, 多年平均降水为 443 mm。流域内多年冻土广泛发育, 其分布海拔范围为 4 700~5 300 m, 土

壤类型以沼泽土与高山草甸土为主。植被类型以高寒草甸(alpine meadow, AM)为主, AM 种类组成较为丰富, 主要是以莎草科为主的蒿草类和苔草类, 如高山蒿草(*Kobresia pygmae*)、藏蒿草(*Kobresia tibetica*)、矮蒿草(*Kobresia humilis*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)等, 植被覆盖度为 30%~98%, 生长最盛时高度为 5~10 cm, 根系深且发达<sup>[20]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

2020 年 08 月中旬, 在长江源区布曲流域进行土壤样品的采集(图 1), 参考唐古拉站气象、水文站点的分布, 按照海拔的变化, 共取 23 个采样点。采用五点混合取样法采集土壤样品, 在每个样点取 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 和 50~100 cm 的 6 层土壤样品, 3 次重复。首先随机选取 10 m×10 m 的样区, 将每个样区平均分为九格, 然后在中间一格以及任意周边两格采集 3 份土壤样品, 然后将同层位的 3 份土壤样品混合均匀成一份总的土壤样品, 编号后进行装袋。使用手持 GPS 记录经度(longitude, LON)、纬度(latitude, LAT)和高程(altitude, ALT)。土壤样品在阴凉处风干, 并清除根系、石砾, 然后在中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室进行土壤理化性质的测定。实验室测定土壤样品的质地、pH 值、有机碳(soil organic carbon, SOC)、无机碳(total inorganic carbon, TIC)、全氮(total nitrogen, TN)、全磷(total phosphorus, TP)、全钾(total kalium, TK)和阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC), 同时用 200 cm<sup>3</sup> 环刀取原状土用于测量土壤的容重(bulk density, BD)和体积含水量(volumetric water content, VWC)。

### 2.2 样品测定

土壤 SOC 的测定方法为重铬酸钾-硫酸外加热容量法, 土壤样品中的有机碳和过量的重铬酸钾-硫酸溶液发生氧化还原反应, 多余的重铬酸钾用硫酸亚铁标准液进行滴定, 通过消耗的重铬酸钾量来计算土壤样品中的有机碳含量。TIC 的测定方法为气量法, TN 的测定方法为凯氏定氮法, 碳氮比(C/N)通过 SOC 与 TN 的比值计算获得。土壤 TP 的测定采用碱熔-钼锑抗比色法, TK 的测定方法为碱熔-火焰光度法, CEC 的测定方法为乙酸铵法, pH 值的测定方法为溶液-电极法。土壤质地的测定方法为筛分-沉降法, BD 和 VWC 分别采用环刀法和

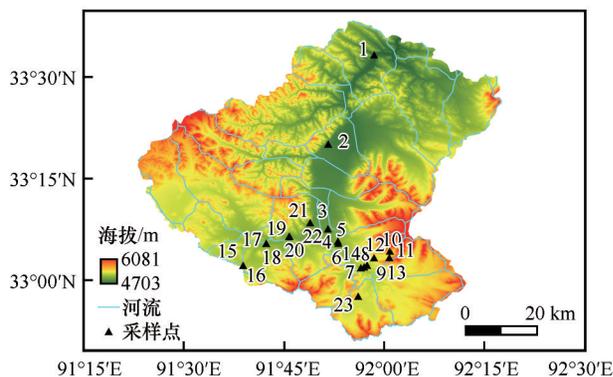


图 1 研究区及采样点位置示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

烘干法测定<sup>[21]</sup>。

### 2.3 数据处理

年均气温(mean annual air temperature, MAT)数据和年均降水量(mean annual precipitation, MAP)数据分别来自于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)的中国1 km分辨率逐月平均气温数据集(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/71ab4677-b66c-4fd1-a004-b2a541c4d5bf/>)和中国1 km分辨率逐月降水量数据集(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2/>)。通过 ArcGIS 10.5 计算并提取每

个采样点的 MAT 和 MAP 数据(表 1)。使用 Origin 2018 软件制图。使用 SPSS 25 对土壤有机碳含量和密度以及其他理化性质进行描述性分析和单因素方差分析,对有机碳含量和气候因子进行线性回归分析,对有机碳含量和其他土壤理化性质进行皮尔逊相关分析。使用公式(1)计算有机碳存量<sup>[15]</sup>。

$$SOCS = \sum_{i=1}^n T_i \times BD_i \times SOCC_i \times \frac{(1 - C_i)}{100} \quad (1)$$

式中:SOCS 为有机碳存量( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ); $T_i$  为第  $i$  层土壤的厚度(cm); $BD_i$  为第  $i$  层土壤的容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); $SOCC_i$  为第  $i$  层土壤有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $C_i$  为第  $i$  层土壤中粒径大于 2 mm 的砾石所占的比率(%)。

表 1 采样点的特征

Table 1 Characteristics of sampling sites

编号	经度/E	纬度/N	海拔/m	年均气温/°C	年均降水量/mm	编号	经度/E	纬度/N	海拔/m	年均气温/°C	年均降水量/mm
1	92.01°	33.56°	4 702	-3.81	322	13	92.05°	33.04°	5 146	-8.56	389
2	91.89°	33.33°	4 765	-3.81	322	14	91.98°	33.01°	5 019	-6.02	365
3	91.89°	33.11°	4 880	-4.65	342	15	91.67°	33.02	5 082	-6.16	361
4	91.89°	33.11°	4 870	-4.65	344	16	91.67°	33.02°	5 042	-6.16	361
5	91.91°	33.08°	4 953	-5.23	358	17	91.73°	33.07°	5 029	-5.41	351
6	91.92°	33.07°	4 938	-5.20	353	18	91.73°	33.07°	4 985	-5.41	351
7	91.97°	33.01°	5 007	-5.90	363	19	91.79°	33.09°	4 949	-5.02	348
8	91.99°	33.02°	5 096	-6.17	367	20	91.79°	33.09°	4 916	-5.02	348
9	91.99°	33.02°	5 084	-6.17	367	21	91.84°	33.13°	4 909	-4.83	382
10	92.05°	33.05°	5 225	-8.29	389	22	91.84°	33.13°	4 870	-4.83	342
11	92.05°	33.05°	5 212	-8.29	389	23	91.97°	32.94°	5 150	-6.87	385
12	92.01°	33.04°	5 110	-6.64	375						

## 3 实验结果

### 3.1 土壤有机碳分布特征

#### 3.1.1 土壤有机碳在剖面中的分布特征

在长江源区布曲流域 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 和 50~100 cm 的 6 个土层中,土壤有机碳含量的平均值±标准差分别为( $10.23 \pm 4.84$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、( $10.18 \pm 5.19$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、( $9.34 \pm 5.20$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、( $9.04 \pm 4.41$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、( $8.01 \pm 4.74$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、( $9.40 \pm 4.67$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2)。土壤有机碳含量的平均值虽然有着随土壤深度增加而降低的趋势( $R^2=0.511$ ),但在剖面中的分布并没有显著差异( $P>0.05$ )。研究区 6 层土壤有机碳存量的平均值±标准差分别为( $0.76 \pm 0.38$ )  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、( $0.76 \pm 0.50$ )  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、( $0.60 \pm 0.41$ )  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、( $0.57 \pm 0.30$ )  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、( $0.53 \pm 0.37$ )  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、( $3.17 \pm 2.34$ )  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其中 50~100 cm 的土层因为厚度的增加而具有较大的土

壤有机碳存量。在研究区 0~50 cm 内的 5 个土层中,土壤有机碳存量有随深度增加而降低的趋势( $R^2=0.893$ ),而且 10~20 cm、40~50 cm 两个土层的有机碳存量呈现出显著的差异( $P<0.05$ )。根据公式(1)计算,研究区 1 m 以内土壤的有机碳存量的变化范围为 1.59~13.25  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均值±标准差为( $6.38 \pm 3.16$ )  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。研究区土壤有机碳含量和存量的平均值拥有较大的标准差,表明研究区土壤有机碳具有较强的空间变异性。

#### 3.1.2 土壤有机碳在海拔上的分布特征

海拔是环境因子的综合体现,随着海拔的变化,气候条件、土壤水热条件和化学性质以及植被生产力都发生了改变,进而对土壤有机碳的输入、分解和转化过程产生影响<sup>[22]</sup>。在研究区 4 700~4 800 m、4 800~4 900 m、4 900~5 000 m、5 000~5 100 m 和 5 100~5 250 m 的 5 个海拔范围内,1 m 以内土壤有机碳含量的平均值±标准差分别为( $7.80 \pm 3.05$ )  $\text{g} \cdot$

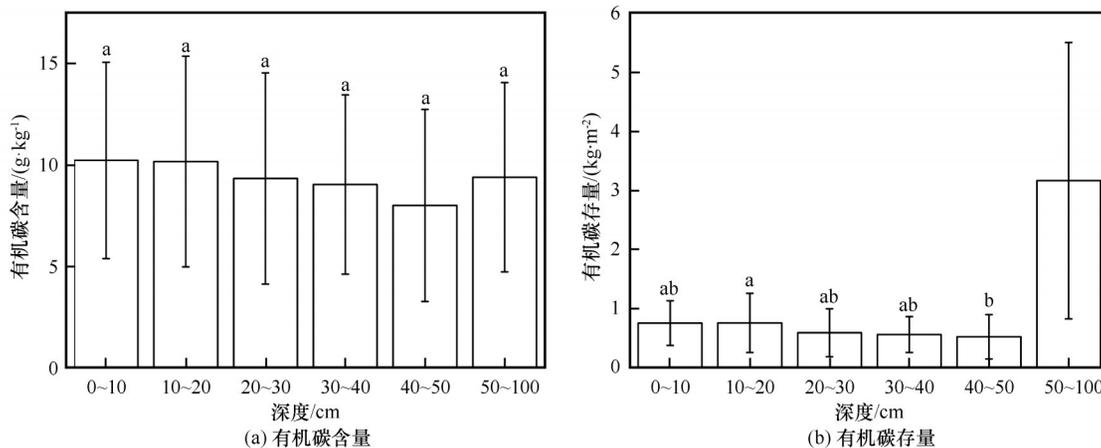


图2 土壤有机碳在剖面中的分布特征

Fig. 2 Soil organic carbon contents and stocks in profiles

$\text{kg}^{-1}$ 、 $(8.35 \pm 2.35) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(9.19 \pm 3.49) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(10.64 \pm 3.51) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(9.72 \pm 4.20) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3)。研究区1 m以内土壤的平均有机碳含量虽然与海拔存在一定的正相关关系,但是并不显著( $P > 0.05$ )。在

4 700~5 100 m的海拔范围内,研究区土壤的有机碳含量随着海拔的升高而增加,然后在5 000~5 100 m海拔处达到最大值,而研究区在5 100~5 250 m海拔处的土壤有机碳含量要低于5 000~5 100 m海拔处。

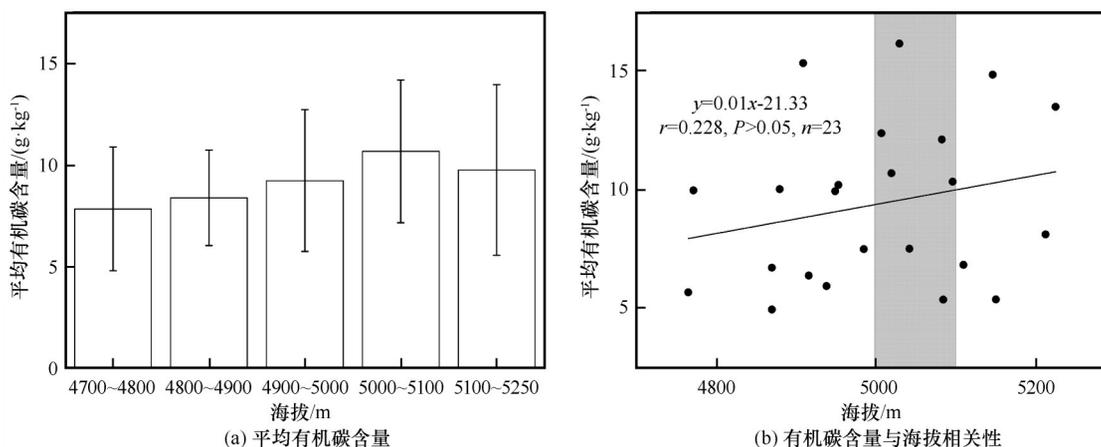


图3 土壤有机碳在海拔上的分布特征

Fig. 3 Soil organic carbon contents at different altitudes

### 3.2 土壤其他化学性质变化特征

长江源区布曲流域1 m以内土壤pH值平均值的范围变化为7.45~7.70,表明研究区土壤以弱碱性为主,土壤pH值的平均值随土壤深度的增加而增加,0~10 cm与50~100 cm土层的pH值存在显著的差异( $P < 0.05$ )。研究区土壤全氮平均值的范围变化为0.72~0.89  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其最大值出现在10~20 cm的土层中。研究区土壤碳氮比的平均值均小于15,表明研究区土壤含有大量的易分解有机碳,即研究区土壤有机碳具有较高的分解潜力<sup>[23]</sup>。研究区土壤全钾平均值的范围变化为9.60~10.33  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全磷平均值的范围变化为0.46~0.50  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,阳离子交

换量平均值的变化范围为7.05~8.67  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,无机碳含量平均值的变化范围为14.60~17.52  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。研究区土壤全钾、全磷、阳离子交换量和无机碳含量在不同土层分布上的差异不显著( $P > 0.05$ )。

### 3.3 土壤物理性质变化特征

长江源区布曲流域1 m以内土壤容重平均值的范围变化为1.08~1.39  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,随深度的增加而增加,0~10 cm土层的容重与其他土层的容重具有显著差异( $P < 0.05$ )。研究区内土壤体积含水量平均值的范围变化为0.21~0.28  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,其最大值出现在表层的0~10 cm,但是各土层的体积含水量不存在显著差异( $P > 0.05$ )。研究区1 m以内土壤的质

表2 土壤其他化学性质变化特征(平均值±标准差)

Table 2 Soil chemical properties variables in different soil layers (average ± standard deviation)

土壤 化学性质	土壤剖面深度/cm					
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~100
pH值	7.45±0.53b	7.55±0.45ab	7.59±0.35ab	7.65±0.40ab	7.66±0.40ab	7.70±0.37a
全氮/g·kg <sup>-1</sup>	0.85±0.21ab	0.89±0.23a	0.82±0.20abc	0.72±0.16c	0.75±0.20bc	0.75±0.23bc
碳氮比	12.35±6.14a	11.64±6.20a	11.87±7.59a	12.86±6.80a	11.58±7.93a	12.96±6.99a
全钾/g·kg <sup>-1</sup>	9.79±2.22a	9.60±2.16a	10.10±2.04a	10.33±2.71a	10.19±2.35a	10.08±1.95a
全磷/g·kg <sup>-1</sup>	0.50±0.14a	0.50±0.09a	0.46±0.09a	0.48±0.13a	0.47±0.12a	0.47±0.12a
阳离子交换量/cmol·kg <sup>-1</sup>	8.67±3.42a	8.12±3.21a	7.90±3.51a	7.11±2.97a	7.05±3.35a	7.85±3.29a
无机碳/g·kg <sup>-1</sup>	14.65±3.96a	14.60±4.37a	16.44±6.65a	17.52±6.18a	16.35±6.17a	16.51±4.98a

注: 小写字母表示不同土层间土壤理化性质的显著差异 ( $P<0.05$ )。

Note: different lowercase letters indicate significant differences in soil physical and chemical properties among different soil layers based on the one-way ANOVA (with LSD test) at the level of  $P<0.05$ .

表3 土壤物理性质变化特征(平均值±标准差)

Table 3 Soil physical properties variables in different soil layers (average ± standard deviation)

土壤物理性质	土壤剖面深度/cm					
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~100
容重/g·cm <sup>-3</sup>	1.08±0.28b	1.25±0.23a	1.32±0.29a	1.39±0.28a	1.38±0.23a	1.39±0.28a
体积含水量/g·cm <sup>-3</sup>	0.28±0.16a	0.23±0.10a	0.24±0.15a	0.22±0.11a	0.22±0.12a	0.21±0.11a
砂粒/%	96.05±5.41a	96.63±5.05a	96.94±4.33a	98.48±2.29a	98.97±1.60a	99.19±1.42a
粉粒/%	2.57±4.21a	2.36±3.75a	2.21±3.19a	1.02±1.44a	0.70±0.88a	0.72±1.13a
黏粒/%	1.38±1.74a	1.01±1.52a	0.85±1.44a	0.50±1.18a	0.34±0.96a	0.08±0.38a

注: 小写字母表示不同土层间土壤理化性质的显著差异 ( $P<0.05$ )。

地主要为砂土和壤质砂土,土壤的砂粒含量的平均值随深度的增加而增加,粉粒含量和黏粒含量的平均值随深度的增加而降低,而且各土层之间的砂粒含量、粉粒含量和黏粒含量的差异并不显著( $P>0.05$ )。

## 4 讨论

### 4.1 土壤有机碳含量与植被的关系

在自然条件下,土壤有机碳的输入主要来源于植被地表凋落物和细根系的周转<sup>[24]</sup>。已有研究表明,藏东南高寒草甸80%的根系集中分布在0~10 cm的土层中,植被的根系数量随着土壤深度的增加而减少<sup>[25]</sup>。随着土壤深度的增加,藏北高寒草甸的根系生物量也呈指数下降,而且其与土壤碳氮含量呈正相关,深层土壤的根系则分布较少且变化趋于平缓<sup>[26]</sup>。研究区土壤的有机碳含量和存量均有着随土壤深度的增加而降低的趋势,与前人在青藏高原其他地区的研究结果一致<sup>[27-8]</sup>。研究区较浅层的土壤具有较高的有机碳含量和存量,这可能与植被根系的数量和形态在土壤剖面中的分布有关。布曲流域主要植被类型为高寒草甸,其根系主要分布在浅层,这为表层土壤有机碳的积累提供了充足

的物质来源。

研究区1 m以内土壤的有机碳存量的平均值±标准差为(6.38±3.16) kg·m<sup>-2</sup>。Zhao等<sup>[14]</sup>评估青藏高原高寒草甸1 m深土壤的有机碳存量为14.07 kg·m<sup>-2</sup>,也有研究表明青藏高原1 m深土壤的有机碳存量为(8.70±1.19) kg·m<sup>-2</sup><sup>[24]</sup>。本研究的结果略低于前人的研究,这种差异可能是由于研究区域的差异导致的。

### 4.2 土壤有机碳含量与气候因子的关系

气温与降水的差异是影响多年冻土区土壤有机碳分布的重要因素,低温有利于抑制微生物和酶的活性,减少有机碳的分解,高降水量则有利于提高土壤水分,促进植被生长和有机质的输入,从而有利于土壤有机碳的积累<sup>[29]</sup>。通过分析布曲流域1 m以内土壤的平均有机碳含量随年均气温和年均降水量的变化(图4),结果表明,研究区1 m以内土壤的平均有机碳含量与年均气温存在一定的负相关关系,与年均降水量存在一定的正相关关系,但是均不显著( $P>0.05$ )。已有前人研究表明,气候因子对土壤有机质分布的控制主要在土壤表层<sup>[30]</sup>,而深层土壤有机碳含量低且稳定性较强,土壤的缓冲能力也可以

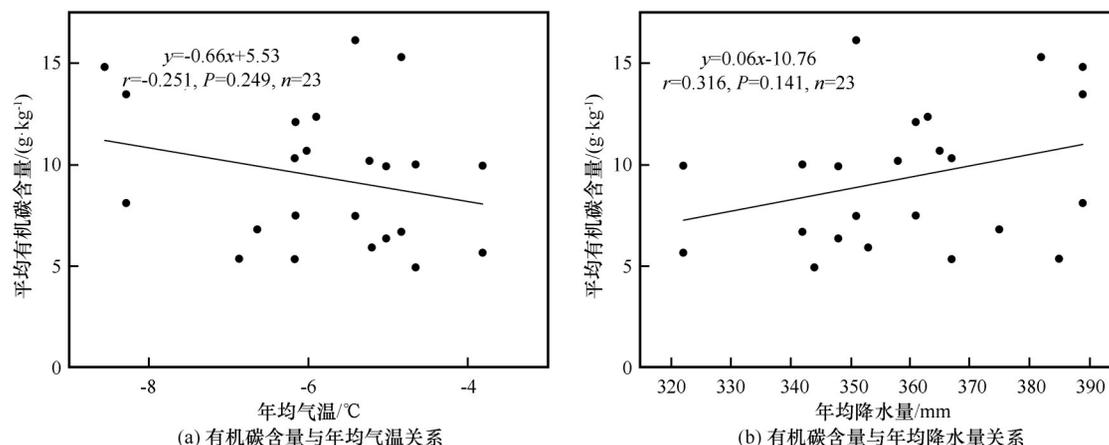


图4 土壤有机碳含量与年均气温、年均降水的关系

Fig. 4 Soil organic carbon content vs mean annual temperature and mean annual precipitation

减弱气候因子对土壤有机碳的影响<sup>[24]</sup>。此外,高寒草甸的植被可能还受到冻土的影响,多年冻土的存在可以为植被生长提供水分<sup>[31]</sup>。研究区温泉和河流发育,在距离河流或温泉等较近的地方土壤含水量高,而研究区年均降水量则较少且以固态降水为主,降水对研究区土壤含水量的提升不如温泉、河流等显著,从而导致年均气温和年均降水量对研究区1 m以内土壤有机碳含量的影响不显著( $P>0.05$ )。

#### 4.3 土壤有机碳含量与其理化性质的关系

土壤的理化性质对土壤有机碳也有重要的影响<sup>[32]</sup>。在4 700~5 100 m的海拔范围内,研究区土壤

有机碳含量随海拔的升高而增加,然后在5 000~5 100 m海拔处达到最大值后降低。Li等<sup>[33]</sup>研究表明,青藏高原土壤有机碳含量会随着海拔升高而增加,然后在4 800~4 950 m海拔处达到最大值后减少。牟翠翠等<sup>[34]</sup>研究表明,由于微地形和土壤含水量的差异,祁连山区黑河流域俄博岭多年冻土区土壤有机碳含量也有着随海拔升高而增加,然后在3 600~3 650 m海拔处达到最大值后减少的规律。为探讨布曲流域土壤理化性质对1 m以内土壤有机碳含量影响,将研究区土壤有机碳含量与土壤理化性质进行了皮尔逊相关分析(表4)。

表4 土壤有机碳含量与其理化性质的关系(皮尔逊相关系数)

Table 4 Soil organic carbon content vs soil physical and chemical properties (Pearson correlation coefficient)

指标	pH	全氮	碳氮比	全磷	全钾	无机碳	阳离子交换量	容重	体积含水量	黏粒	有机碳
pH	1.000										
全氮	-0.184	1.000									
碳氮比	-0.558**	-0.161	1.000								
全磷	-0.172	0.153	-0.234	1.000							
全钾	-0.332	-0.013	0.194	0.005	1.000						
无机碳	0.577*	-0.386	0.015	-0.343	-0.259	1.000					
阳离子交换量	-0.262	0.428*	0.011	0.073	0.249	-0.489	1.000				
容重	0.030	-0.539**	0.468*	-0.344	0.044	0.642*	-0.136	1.000			
体积含水量	-0.563**	0.423*	0.197	0.095	0.022	-0.458	0.398	-0.287	1.000		
黏粒	-0.454*	0.352	-0.133	0.430*	-0.034	-0.607*	0.340	-0.685**	0.461*	1.000	
有机碳	-0.663**	0.383	0.841**	-0.103	0.216	-0.517	0.273	0.143	0.439*	0.083	1.000

注: \*表示 $P<0.05$ ; \*\*表示 $P<0.01$ 。

研究区土壤有机碳含量与pH值呈极显著负相关( $P<0.01$ ),土壤pH值过低( $<5.5$ )或过高( $>8.5$ )都会抑制微生物的活性<sup>[22]</sup>,而研究区弱碱性的土壤为微生物提供了适宜的生存环境,从而促进微生物

和酶对土壤有机碳的分解和转化<sup>[35]</sup>。研究区土壤有机碳含量与碳氮比呈极显著的正相关( $P<0.01$ ),碳氮比是土壤腐殖质转化和矿化速度快慢的重要指标,碳氮比越高的土壤碳的分解程度较低<sup>[23]</sup>,也

是土壤有机碳可以积累的重要特征。研究区土壤有机碳含量与体积含水量呈显著的正相关( $P < 0.05$ ),布曲流域是干旱的高寒高海拔地区,土壤水分是制约青藏高原等干旱地区植被生长的重要因素,土壤水分的改变会影响植被根系的形态和分布<sup>[25]</sup>,土壤水分的提高有利于促进植被生长和土壤有机碳输入<sup>[36]</sup>。此外,不同湿度的土壤具有不同的微生物特征<sup>[37]</sup>,土壤水分的提高有利于降低微生物对土壤有机碳的分解。植被输入的增加,或是微生物分解的减少,都将有利于土壤有机碳的积累。

研究区表层土壤具有较高的氮含量,可能是因为土壤表层累积了大量未分解凋落物且更容易接受大气中的氮素,以及植物根系吸收氮素后会归还到表层所导致的<sup>[38]</sup>。土壤有机碳与全氮存在一定的正相关( $P > 0.05$ ),适量的土壤有机氮有利于促进植被生长与提高微生物活性<sup>[39]</sup>,过量氮输入可以改变土壤微生物特征,从而对土壤有机碳矿化存在抑制作用,然而这种抑制作用对连续多年冻土区土壤并不显著<sup>[40]</sup>。青藏高原冻土区的土壤普遍存在氮限制<sup>[41]</sup>,植被和微生物对土壤氮素存在竞争,而土壤氮素的分配可能优先供给植被进行生长繁殖<sup>[42]</sup>,从而有利于土壤有机碳的输入。已有研究表明,磷输入有利于高含水量土壤有机碳的矿化和可溶性碳淋失,对低含水量土壤的影响则不显著<sup>[43]</sup>。布曲流域土壤含水量较低,从而导致土壤有机碳含量与全磷的负相关关系不显著( $P > 0.05$ )。

青藏高原土壤无机碳含量随土壤深度的增加而降低<sup>[44]</sup>。布曲流域土壤无机碳含量在不同土层上分布的差异不显著( $P > 0.05$ ),研究区土壤温度虽然有着随深度增加而降低的趋势<sup>[45]</sup>,有利于深层土壤溶液中的无机碳析出为碳酸盐,但布曲流域降水量少且分布较为均匀,降水形式也大多为固态降水,从而导致研究区土壤淋溶作用差异较小。已有研究表明,土壤有机碳与无机碳之间存在相互补偿作用<sup>[46]</sup>,而研究区土壤有机碳含量与无机碳含量之间的负相关不显著( $P > 0.05$ ),表明研究区土壤有机碳与无机碳之间不存在相互补偿作用。土壤阳离子交换量具有缓冲土壤 pH 并保持土壤养分的作用<sup>[47]</sup>,而研究区土壤阳离子交换量对土壤有机碳的影响并不显著( $P > 0.05$ ),可能是因为 pH 值对土壤有机碳的影响更直接,从而掩盖了阳离子交换量对土壤有机碳含量的影响。

土壤有机质的容重重要小于矿物质<sup>[48]</sup>,布曲流域

土壤的容重随深度的增加而降低,这是因为深层土壤有机质含量较低,而且深层土壤会受到上覆土层的压实作用<sup>[49]</sup>,从而导致其容重更大。研究区土壤容重与有机碳含量的负相关不显著( $P > 0.05$ ),可能是因为压实作用大于有机质对容重的影响。布曲流域气温低、降水量少且地形起伏相对较小,缺少风化作用,使得研究区土壤质地以砂土和壤质砂土为主。土壤粒径随深度的变化是由土壤发生层决定的,越接近母质层和基岩,风化程度越小,土壤粒径也就越大<sup>[50]</sup>。土壤黏粒对有机质具有一定的吸附作用,可以促进土壤有机质的沉积,已有研究表明,藏北表层土壤有机碳含量与黏粒含量存在显著的相关性,而 15 cm 以下土层的有机碳含量与黏粒含量不存在显著相关性<sup>[51]</sup>。布曲流域土壤质地以砂土和壤质砂土为主,黏粒含量低且差异不显著,因而对有机质的吸附作用有限且差异较小,从而导致研究区土壤黏粒含量对有机碳的影响不显著( $P > 0.05$ )。因此,长江源区布曲流域 1 m 以内土壤有机碳含量的主要相关因素为土壤的 pH 值、碳氮比和体积含水量。

## 5 结论

多年冻土区土壤有机碳不仅是土壤肥力的物质基础,更对全球气候变化存在迅速而强烈的响应和反馈。通过研究长江源区布曲流域多年冻土有机碳在剖面内和海拔上的分布特征,并探讨 1 m 以内土壤有机碳含量的相关因素,可以获得以下认识:

(1)在长江源区布曲流域 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 和 50~100 cm 的 6 个土层中,土壤有机碳含量的平均值 $\pm$ 标准差分别为(10.23 $\pm$ 4.84) g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、(10.18 $\pm$ 5.19) g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、(9.34 $\pm$ 5.20) g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、(9.04 $\pm$ 4.41) g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、(8.01 $\pm$ 4.74) g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、(9.40 $\pm$ 4.67) g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,随土壤深度增加而降低( $R^2=0.511$ )。土壤有机碳含量与海拔并非线性相关( $P > 0.05$ ),而是在 4 700~5 100 m 的海拔范围内,1 m 以内土壤的平均有机碳含量先随海拔的升高而增加,然后在 5 000~5 100 m 海拔处达到最大值后降低。

(2)研究区 1 m 以内土壤有机碳含量与 pH 值呈极显著的负相关( $P < 0.01$ ),与碳氮比呈极显著的正相关( $P < 0.01$ ),与体积含水量呈显著的正相关关系( $P < 0.05$ ),而与年均气温、年均降水量、全氮、全磷、

全钾、无机碳含量、阳离子交换量、容重和黏粒含量的相关性不显著( $P>0.05$ ),表明长江源区布曲流域 1 m 以内土壤有机碳含量的主要相关因素为土壤的 pH 值、碳氮比和体积含水量。

### 参考文献(References):

- [1] Qin Dahe. Glossary of cryospheric science[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2016. [秦大河. 冰冻圈科学辞典[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2016.]
- [2] Wang Genxu, Yang Yan, Zhang Guangtao, et al. Cryosphere ecosystems: outpost and barrier in global change[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 425-433. [王根绪, 杨燕, 张光涛, 等. 冰冻圈生态系统: 全球变化的前哨与屏障[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 425-433.]
- [3] Wu Jichun, Sheng Yu, Wu Qingbai, et al. Processes and modes of permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2009, 39(11): 1570-1578. [吴吉春, 盛煜, 吴青柏, 等. 青藏高原多年冻土退化过程及方式[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(11): 1570-1578.]
- [4] Zhang Feng, Mu Mei, Fan Chengyan, et al. Studies of permafrost carbon cycle in the Third Polar and Arctic regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 170-181. [张凤, 母梅, 范成彦, 等. 从第三极到北极: 多年冻土碳循环研究进展[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 170-181.]
- [5] Cheng Guodong, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2783-2795. [程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2783-2795.]
- [6] Zhao Lin, Hu Guojie, Zou Defu, et al. Permafrost changes and its effects on hydrological processes on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1233-1246. [赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1233-1246.]
- [7] Mu Cuicui, Li Lili, Wu Xiaodong, et al. Greenhouse gas released from the deep permafrost in the northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4205.
- [8] Abbott B W, Larouche J R, Jones Jr J B, et al. Elevated dissolved organic carbon biodegradability from thawing and collapsing permafrost [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(10): 2049-2063.
- [9] Kang Shichang, Huang Jie, Mu Cuicui, et al. Cryospheric chemistry: fingerprint to decipher climate/environmental changes and anthropogenic activities [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 456-465. [康世昌, 黄杰, 牟翠翠, 等. 冰冻圈化学: 解密气候环境和人类活动的指纹[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 456-465.]
- [10] Qiu J. China: the third pole [J]. Nature, 2008, 454(7203): 393-396.
- [11] Ran Youhua, Li Xin, Cheng Guodong, et al. Mapping the permafrost stability on the Tibetan Plateau for 2005 - 2015 [J]. Science China Earth Sciences, 2021, 64(1): 62-79.
- [12] Wang Li, Zeng Hui, Zhang Yangjian, et al. A review of research on soil carbon storage and its influencing factors in the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(11): 3506-3515. [王荔, 曾辉, 张扬建, 等. 青藏高原土壤碳储量及其影响因素研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3506-3515.]
- [13] 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.
- [14] Zhao Lin, Wu Xiaodong, Wang Zhiwei, et al. Soil organic carbon and total nitrogen pools in permafrost zones of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 3656.
- [15] Ding Jinzhi, Wang Tao, Piao Shilong, et al. The paleoclimatic footprint in the soil carbon stock of the Tibetan permafrost region [J]. Nature Communications, 2019, 10: 4195.
- [16] Wang Taihua, Yang Dawen, Yang Yuting, et al. Permafrost thawing puts the frozen carbon at risk over the Tibetan Plateau [J]. Science Advances, 2020, 6(19): eaaz3513.
- [17] Wang Dong, Wu Tonghua, Zhao Lin, et al. A 1 km resolution soil organic carbon dataset for frozen ground in the Third Pole [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(7): 3453-3465.
- [18] Ma Qiang, Jin Huijun. Impacts of climate warming on soil organic carbon pools in permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 91-103. [马蔷, 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.]
- [19] Wang Genxu, Hu Hongchang, Li Taibin. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed [J]. Journal of Hydrology, 2009, 375(3/4): 438-449.
- [20] Wang Lihui, He Xiaobo, Ding Yongjian. Characteristics and influence factors of the evapotranspiration from alpine meadow in central Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 801-808. [王利辉, 何晓波, 丁永建. 青藏高原中部高寒草甸蒸散发特征及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 801-808.]
- [21] Zha Tonggang. Soil physicochemical analysis [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017. [查同刚. 土壤理化分析[M]. 北京: 中国林业出版社, 2017.]
- [22] Zhang Peng, Zhang Tao, Chen Nianlai. Vertical distribution patterns of soil organic carbon and total nitrogen and related affecting factors along northern slope of Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 518-524. [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.]
- [23] Schädel C, Schuur E A G, Bracho R, et al. Circumpolar assessment of permafrost C quality and its vulnerability over time using long-term incubation data [J]. Global Change Biology, 2014, 20(2): 641-652.
- [24] Wang Genxu, Yi Shuhua. Circumpolar assessment of permafrost C quality and its vulnerability over time using long-term incubation data [M]. Beijing: Science Press, 2019. [王根绪, 宜树华. 冰冻圈变化的生态过程与碳循环影响[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [25] Yang Chunjiao, Chen Dairu, Zhang Dacai. Root morphology and distribution characteristics of plants in different habitats of alpine meadow in southeast Tibet [J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(4): 79-84. [杨春娇, 陈玳汝, 张大才. 藏东南高寒草甸不同生境植物根系形态及分布特征[J]. 中国草地学报, 2020, 42(4): 79-84.]
- [26] Zhang Haorui, Fu Gang. Root biomass, carbon and nitrogen distribution pattern and correlation characteristics of alpine meadow in northern Tibet [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3625-3633. [张豪睿, 付刚. 藏北高寒草甸根系生物量与碳氮分布格局及关联特征[J]. 生态学报, 2021, 41(9):

- 3625-3633.]
- [27] Sun Weixia, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng. Distribution pattern and density calculation of soil organic carbon in profile[J]. *Soils*, 2003, 35(3): 236-241. [孙维侠, 史学正, 于东升. 土壤有机碳的剖面分布特征及其密度的估算方法研究——以我国东北地区为例[J]. *土壤*, 2003, 35(3): 236-241.]
- [28] Yang Renmin, Zhang Ganlin, Yang Fei, et al. Precise estimation of soil organic carbon stocks in the northeast Tibetan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21842.
- [29] Packalen M S, Finkelstein S A, McLaughlin J W. Climate and peat type in relation to spatial variation of the peatland carbon mass in the Hudson Bay Lowlands, Canada[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(4): 1104-1117.
- [30] Tian Yuqiang, Ouyang Hua, Song Minghua, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in alpine ecosystems on Tibetan Plateau transect[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2007, 33(4): 443-449. [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.]
- [31] Li Lin, Wang Zhenyu, Xu Weixin, et al. Response of growth of typical plateau meadow on Tibetan Plateau to climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 1006-1013. [李林, 王振宇, 徐维新, 等. 青藏高原典型高寒草甸植被生长发育对气候和冻土环境变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 1006-1013.]
- [32] Doetterl S, Stevens A, Six J, et al. Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 780-783.
- [33] Li Cuilan, Cao Zhiyuan, Chang Jingjing, et al. Elevational gradient affect functional fractions of soil organic carbon and aggregates stability in a Tibetan alpine meadow[J]. *Catena*, 2017, 156: 139-148.
- [34] Mu Cuicui, Zhang Tingjun, Cao Bin, et al. Study of the organic carbon storage in the active layer of permafrost over the eboling mountain in the upper reaches of the Heihe River in the eastern Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(1): 1-9. [牟翠翠, 张廷军, 曹斌, 等. 祁连山区黑河上游俄博岭多年冻土区活动层碳储量研究[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 1-9.]
- [35] Min K, Lehmeier C A, Ballantyne F, et al. Differential effects of pH on temperature sensitivity of organic carbon and nitrogen decay[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 193-200.
- [36] Yang Xiujing, Huang Mei, Wang Junbang, et al. Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2032-2042. [杨秀静, 黄玫, 王军邦, 等. 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2013, 33(7): 2032-2042.]
- [37] Chen Youchao, Ma Shuqin, Jiang Hongmao, et al. Influences of litter diversity and soil moisture on soil microbial communities in decomposing mixed litter of alpine steppe species[J]. *Geoderma*, 2020, 377: 114577.
- [38] Bai Junhong, Ding Qiuyi, Gao Haifeng, et al. Spatial distribution of nitrogen in marsh soils with different plant communities in Xianghai Wetland[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(3): 381-384. [白军红, 丁秋祎, 高海峰, 等. 向海湿地不同植被群落下土壤氮素的分布特征[J]. *地理科学*, 2009, 29(3): 381-384.]
- [39] Yang Jun, Liu Qirong, Wang Xiangtao. Plant community and soil nutrient of alpine meadow in different degradation stages on the Tibetan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4067-4072. [杨军, 刘秋蓉, 王向涛. 青藏高原高山嵩草高寒草甸不同退化阶段植物群落与土壤养分[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4067-4072.]
- [40] Li Yingchen, Song Changchun, Hou Cuicui, et al. Effects of exogenous nitrogen availability on carbon mineralization of different wetland soil types in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(12): 1480-1486. [李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 等. 氮可利用性对东北不同类型湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. *地理科学*, 2011, 31(12): 1480-1486.]
- [41] Baumann F, He Jinsheng, Schmidt K, et al. Pedogenesis, permafrost, and soil moisture as controlling factors for soil nitrogen and carbon contents across the Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(12): 3001-3017.
- [42] Wu Minghui, Qu Deye, Li Ting, et al. Effects of permafrost degradation on soil microbial biomass carbon and nitrogen in the Shule River headwaters, the Qilian Mountains[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(1): 177-186. [吴明辉, 瞿德业, 李婷, 等. 祁连山疏勒河源区冻土退化对土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. *地理科学*, 2021, 41(1): 177-186.]
- [43] Liu Deyan, Song Changchun. Effects of phosphorus enrichment on mineralization of organic carbon and contents of dissolved carbon in a freshwater marsh soil[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(9): 769-774. [刘德燕, 宋长春. 磷输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性碳组分的影响[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(9): 769-774.]
- [44] Zhang Beibei, Liu Fang, Ding Jinzhi, et al. Soil inorganic carbon stock in alpine grasslands on the Qinghai-Xizang Plateau: an updated evaluation using deep cores[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(2): 93-101. [张蓓蓓, 刘芳, 丁金枝, 等. 青藏高原高寒草地3米深度土壤无机碳库及分布特征[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(2): 93-101.]
- [45] Wang Shaoyong, He Xiaobo, Ding Yongjian, et al. Characteristics and influencing factors of stable hydrogen and oxygen isotopes in groundwater in the permafrost region of the source region of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 166-172. [汪少勇, 何晓波, 丁永建, 等. 长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 166-172.]
- [46] Zu Yuangang, Li Ran, Wang Wenjie, et al. Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in Northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5207-5216. [祖元刚, 李冉, 王文杰, 等. 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[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5207-5216.]
- [47] Fang Kai, Kou Dan, Wang Guanqin, et al. Decreased soil cation exchange capacity across Northern China's grasslands over the last three decades[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(11): 3088-3097.
- [48] Zou Ganghua, Li Yong, Li Yuyuan, et al. Estimation of soil bulk density for paddy soils in a typical catchment in southern subtropical China[J]. *Soils*, 2013, 45(2): 1326-1331. [邹刚华, 李勇, 李裕元, 等. 亚热带典型小流域水稻土壤体积质量预测模型构建与评估[J]. *土壤*, 2013, 45(2): 1326-1331.]
- [49] Tranter G, Minasny B, McBratney A B, et al. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23(4): 437-443.
- [50] Sun Zhe, Wang Yibo, Liu Guohua, et al. Heterogeneity analy-

sis of soil particle size distribution in the process of degradation of alpine meadow in the permafrost regions based on multifractal theory [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 980-990. [孙哲, 王一博, 刘国华, 等. 基于多重分形理论的多年冻土区高寒草甸退化过程中土壤粒径分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 980-990.]

[51] Cao Yingzi, Wang Xiaodan. Spatial distribution of soil organic carbon and influencing factors in the alpine steppe of Northern Tibet [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2): 213-219. [曹樱子, 王小丹. 藏北高寒草原样带土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 213-219.]

## Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in Buqu catchment in the source region of the Yangtze River, China

ZHANG Chaofei<sup>1,2</sup>, MA Suping<sup>1</sup>, HE Xiaobo<sup>3,4</sup>, WANG Shaoyong<sup>3,5</sup>

(1. Key Laboratory of Oil and Gas Resources Research of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. Key Laboratory of Eco-hydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 5. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** We collected 138 soil samples from 23 sampling sites in the Buqu catchment, the source region of the Yangtze River, China. We examined the distribution pattern of soil organic carbon (SOC), and further discussed the possible influencing factors of SOC content within 1 m. The results showed SOC contents in the 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 and 50~100 cm layers were (10.23±4.84), (10.18±5.19), (9.34±5.20), (9.04±4.41), (8.01±4.74), (9.40±4.67) g·kg<sup>-1</sup>, respectively. SOC content decreased with the increasing soil depth ( $R^2=0.511$ ). There was no significant linear relationship between SOC content and altitude ( $P>0.05$ ). With the increasing elevation, SOC content was gradually increased between 4 700 to 5 100 m, while the SOC then gradually declined with elevation from 5 100 to 5 250 m. SOC content was negatively correlated with soil pH value ( $P<0.01$ ), but positively correlated with C/N ratio ( $P<0.01$ ). The SOC content was also positively correlated with volume water content ( $P<0.05$ ), but had no significant correlation with mean annual temperature, mean annual precipitation, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, inorganic carbon content, cation exchange capacity, bulk density and clay content ( $P>0.05$ ). Therefore, soil pH value, C/N ratio and volumetric water content were the main factors that were closely associated with the SOC content within 1 m depths. The results can provide a useful dataset for studying soil carbon cycle in the Buqu catchment, the source region of the Yangtze River, China.

**Key words:** source region of the Yangtze River; Buqu catchment; permafrost; organic carbon; influence factors

(责任编辑: 吴晓东)