

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.261>



祁连山不同草地类型区土壤有机碳组份的差异

梁冰妍^{1,2},徐海燕^{1*},吴晓东²,种碧莹¹,甘子鹏¹,薛守业¹

1. 兰州交通大学环境与市政工程学院,甘肃兰州 730070

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈国家重点实验室青藏高原冰冻圈观测研究站,甘肃兰州 730000

摘要:为明确高寒地区土壤有机碳库的组成及稳定程度,选择祁连山地区3种草地类型区(高寒草甸、高寒草原和高寒沼泽草甸)为研究对象,分层对0~50 cm土壤中重组、轻组组分进行分离提取,测定并分析重组有机碳(heavy fraction organic carbon,HFOC)和轻组有机碳(light fraction organic carbon,LFOC)含量。结果表明,不同草地类型对土壤HFOC和LFOC含量及其分配的影响不同,HFOC、LFOC含量在土层间均具有明显的垂直变化,呈上高下低趋势,各区域间差异明显;高寒沼泽草甸LFOC含量最高,高寒草原次之,高寒草甸最低,即不同草地类型区土壤有机碳库稳定程度大小依次为:高寒草甸>高寒草原>高寒沼泽草甸;土壤pH、含水率、TC、SOC、TN含量与C/N值与土壤HFOC、LFOC含量呈极显著相关($p<0.01$)。综上,祁连山草地生态系统土壤有机碳库组成及稳定程度受草地类型、土壤理化性质及环境变量影响。

关键词:高寒地区;草地类型;重组有机碳;轻组有机碳;土壤理化性质;环境地质学。

中图分类号: P66

文章编号: 1000-2383(2024)04-1487-11

收稿日期:2022-03-03

Differences of Soil Organic Carbon Components in Different Grassland Types of Qilian Mountain

Liang Bingyan^{1,2}, Xu Haiyan^{1*}, Wu Xiaodong², Chong Biying¹, Gan Zipeng¹, Xue Shouye¹

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

2. Cryosphere Research Station on the Qinghai-Tibet Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of the Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: In order to determine the composition and stability of soil organic carbon pool in alpine areas, different grassland types (alpine meadow, alpine steppe and alpine swamp meadow) in Qilian Mountain area were selected as the research objects, the heavy and light components in 0—50 cm soil were separated and extracted by layer, and the contents of heavy fraction organic carbon (HFOC) and light fraction organic carbon (LFOC) were determined and analyzed. The results show that the effects of different grassland types on the content and distribution of soil HFOC and LFOC were different, the contents of HFOC and LFOC had obvious vertical changes among soil layers, show the trend of high and low, and there were obvious differences among different regions. The order of LFOC content in different grassland types is alpine swamp meadow>alpine steppe>alpine meadow, The order of soil organic carbon pool stability in different grassland types is alpine meadow>alpine steppe>alpine swamp meadow. Soil pH, moisture content, TC, SOC, TN content and C/N value were significantly correlated with soil HFOC and LFOC content($p<0.01$). In summary, the composition and stability of soil organic carbon pool in Qilian grassland ecosystem

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos. 41861011,41871060);中国科学院西部之光项目资助。

作者简介:梁冰妍(1997—),女,硕士研究生,主要从事土壤生态学研究。ORCID:0000-0002-4948-366X. E-mail:11200071@stu.lzjtu.edu.cn

*通讯作者:徐海燕,E-mail:hyxu12@163.com

引用格式:梁冰妍,徐海燕,吴晓东,种碧莹,甘子鹏,薛守业,2024.祁连山不同草地类型区土壤有机碳组份的差异.地球科学,49(4):1487—1497.

Citation: Liang Bingyan, Xu Haiyan, Wu Xiaodong, Chong Biying, Gan Zipeng, Xue Shouye, 2024. Differences of Soil Organic Carbon Components in Different Grassland Types of Qilian Mountain. *Earth Science*, 49(4):1487—1497.

were affected by grassland types, soil physical and chemical properties and environmental variables.

Key words: alpine area; grassland type; heavy fraction organic carbon; light fraction organic carbon; soil physical and chemical properties; environmental geology.

0 引言

在全球陆地生态系统中,草地是分布最广泛的植被类型之一,覆盖了全球约30%的陆地生态系统面积(Dixon *et al.*, 2014).相对于其他生态系统,草地生态系统的碳库主要分布于地下,即根系和土壤有机碳库中,其中,土壤有机碳库占草地生态系统有机碳库的90%以上(Liu and Tara, 2010; Spaw *et al.*, 2020).迄今,诸多学者对我国草地生态系统土壤碳库进行了比较深入的研究,我国陆地生态系统土壤有机碳总量的21%分布在青藏高原(方精云等,2018).

青藏高原草地覆盖面积广阔,约占全国草地面积的40%(Yang *et al.*, 2008),由于高原独特的高寒气候条件,其土壤有机质具有降解程度低、根系贡献高的特点(Jia *et al.*, 2019),高寒草地生态系统中植物根茎比高,加之其低温特征,土壤微生物活动较弱,生态系统同化形成的有机碳可以较长时间地储存于地下根系和土壤中(Dai *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2019),因此积累了大量的土壤有机碳,在全球碳循环中起着至关重要的作用(Li *et al.*, 2013).目前大量研究集中在青藏高原草地生态系统土壤有机碳的储量、性质和分解过程并取得了较好的认识(Li *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2016; Mu *et al.*, 2016),然而,对寒区不同草地类型土壤有机碳的稳定程度知之甚少.土壤有机碳的稳定性取决于土壤有机碳不同组分的构成及其与土壤变量的相互作用,根据物理方法,可将土壤有机碳分为轻组有机碳(light fraction organic carbon, LFOC)和重组有机碳(heavy fraction organic carbon, HFOC)(张丽敏等,2014).轻组有机碳是介于动植物残体和腐殖化有机质之间的有机碳库,其主要成分为动植物残体、菌丝体、孢子、单糖、多糖、半木质素(Wu *et al.*, 2004),是土壤不稳定有机碳库的重要组成(Chaopricha and Marin-Spiotta, 2014; Liu *et al.*, 2019).重组有机碳由分解彻底的有机碳组成,有机质主要成分是腐殖质和矿质颗粒,受土壤矿物不同程度的物理和化学保护,一定程度上反映了土壤保持有机碳的能力,其含量一般占总有机质含量的70%~80%

(Wu *et al.*, 2004),重组有机质结构较稳定和复杂,很难被微生物利用,是土壤的稳定碳库(廖艳等,2011; 张国等,2011).

与土壤有机碳相比,研究HFOC和LFOC含量及分布对于表征寒区草地生态系统土壤中有机碳的时空动态更具有敏感性(Zhang *et al.*, 2020).在全球变暖背景下,青藏高原多年冻土发生明显退化,草地土壤有机碳含量及稳定程度随着退化程度的增加而减小.目前,关于青藏高原草地生态系统土壤碳库稳定程度与环境变量相关性的研究大多局限于单一限制因素(放牧、退化、海拔等)(Wu *et al.*, 2004; 黄桥明等,2020),对不同草地类型土壤HFOC和LFOC含量及其影响因素的研究甚少.祁连山地区位于青藏高原北缘,土壤有机碳储量丰富,受高海拔影响,该地区发育有多年冻土和季节冻土,多年冻土热状态受积雪的影响较大(张凤等,2021),土壤有机碳具有较大的分解潜力,选择该地区不同草地类型(高寒草甸、高寒草原和高寒沼泽草甸)进行采样,分析研究区不同草地类型0~50 cm土壤中HFOC、LFOC含量及分配比例的垂直分布变化,及其与土壤变量和理化性质间的相关性,有助于明确高寒地区草地生态系统土壤有机碳库组成及稳定程度.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青藏高原北缘的祁连山野牛沟地区($98^{\circ}44' \text{E} \sim 99^{\circ}46' \text{E}$, $38^{\circ}18' \text{N} \sim 38^{\circ}50' \text{N}$;图1).该地区气候干旱寒冷,具有典型的高寒半干旱气候特征,海拔范围为2 800~4 500 m(阳勇等,2007),降水年内分布不均,6~8月是降水发生的主要时间段,占年降水量的67%,年均蒸发量约为1 275.9 mm(陶林浩,2016).草地类型的分布以高寒沼泽草甸、高寒草原和高寒草甸较为典型,主要的优势种为高山嵩草(*Kobresia pygmaea*),主要建群种为禾本科植物以及莎草科植物.采样点图1所示.

1.2 样品采集

本研究选择祁连山野牛沟地区(3 100~

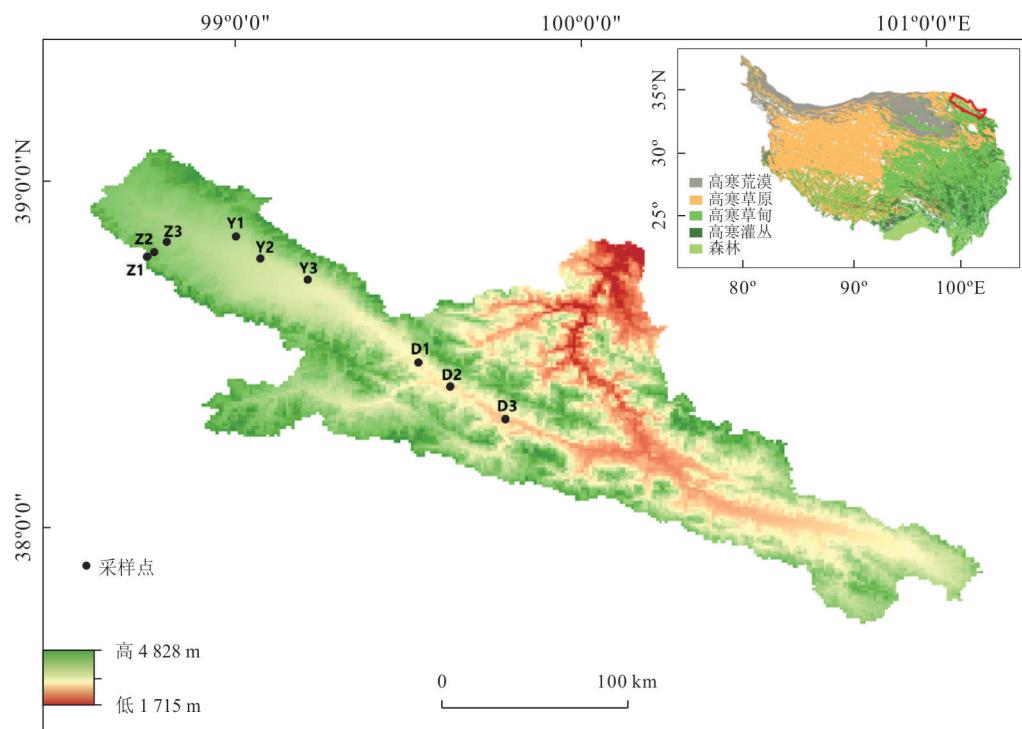


图1 研究区位置及采样点分布

Fig.1 Location and sampling site distribution of the study area

Z1, Z2, Z3为高寒沼泽草甸;Y1, Y2, Y3为高寒草原;D1, D2, D3为高寒草甸.青藏高原植被分类数据来源(Wang et al., 2016)

表1 采样点信息

Table 1 Information of sampling points

样点	经度	纬度	海拔(m)	草地类型	主要植物种类	地上生物量(g/cm ³)	地下生物量(g/cm ³)
Z1	98°44'	38°46'	4 072	高寒沼泽草甸	高山嵩草、黑褐穗薹草	141.60	6 602.55
Z2	98°45'	38°47'	4 002	高寒沼泽草甸	高山嵩草、华扁穗草	182.24	6 207.64
Z3	98°48'	38°49'	3 900	高寒沼泽草甸	高山嵩草、黑褐穗薹草	148.00	6 034.39
Y1	99°0'	38°50'	3 670	高寒草原	高山嵩草、矮生嵩草	183.84	3 337.58
Y2	99°4'	38°46'	3 586	高寒草原	矮生嵩草、紫花针茅	204.64	3 601.27
Y3	99°12'	38°42'	3 485	高寒草原	矮生嵩草、黄花棘豆	188.16	4 585.99
D1	99°31'	38°28'	3 267	高寒草甸	矮生嵩草、紫花针茅	416.64	2 484.08
D2	99°37'	38°24'	3 187	高寒草甸	矮生嵩草、青藏薹草	400.96	1 327.39
D3	99°46'	38°18'	3 062	高寒草甸	矮生嵩草、垂穗披碱草	690.08	2 961.78

4 100 m)不同草地类型区(高寒草甸、高寒草原和高寒沼泽草甸)进行采样,同时测定并记录各样地的经纬度、海拔、草地类型和优势种等状况(表1)。植物样品的采集用直接收获法,在样方中随机选取3组植物长势相近的样地,用25 cm×25 cm的样方框进行圈样,将样方内地上部分植物用剪刀齐地面剪下,装入信封袋中并做好标记,地表植物剪完后,用土钻挖取0~20 cm地下根系,放入自封袋中并做好标记,用于研究区地上、地下生物量的测定。土壤样品的采集是在每个样地使用5点采样法在各点用

土钻自上而下分层采样,土层划分为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm和40~50 cm,将样品混合均匀分3份装入自封袋并做好标记,土壤样品置于4℃车载冰箱运回实验室,去除植物根系、杂石等,置于室内风干,分别过2 mm和100目筛后,备用。

1.3 测定方法

植物地上、地下生物量使用65℃烘干法测定:将采集回的植物样品地上部分剔除枯落物,用50目的筛子将植物样品地下部分的根与土壤分离,去除

死根,于 65℃烘箱内烘干至恒重,称重记录,计算公式如下:植物生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)=植物干物质量(g)/样方面积(m^2);土壤含水率采用 105℃烘干恒重法测定;土壤电导率采用电导率仪测定;土壤 pH 采用电位法(水土比为 5:1)测定;土壤粒径采用激光衍射粒度分析仪(Master-size3000,英国)测定,并采用美国制分类标准进行分级,即黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)及砂粒(0.05~2.00 mm);总氮(TN)采用 KJELTECTM8400 全自动凯氏定氮仪测定;总碳(TC)和总有机碳(SOC)采用 Elementarvario TOC 分析仪高温燃烧法测定;碳氮比(C/N)由总有机碳(SOC)和总氮(TN)的比值得到.

土壤重、轻组分离的方法参考 Janzen *et al.* (1992) 的方法,并进行部分改进:称取 10 g 过 2 mm 筛风干土样于 100 mL 离心管中,加入 50 mL 比重为 1.70 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的 NaI 重液,超声波分散 10 min,使土壤与重液混合均匀.混合物在震速为 200 times/min 条件下震荡 1 h. 分散后的悬浮液在转速为 4 200 r/min 的离心机上离心 20 min. 收集上层悬浮物,重复加入重液,分离、离心,上述步骤重复 3 次,将所得轻组物质样品用 0.45 μm 滤膜真空抽滤并洗涤,收集滤膜上样品至烧杯中,于 50℃烘干,研磨;离心管底部的重组物质用 0.01 mol/L 的 CaCl₂ 溶液洗涤,再用蒸馏水淋洗直至无 Cl⁻ 反应,并转移至已称重的铝盒中,在 60℃下烘干至恒重,称重. 测定样品重量回收率,所得回收率均在 95% 以上,得到重组物质占整个样品质量的比例,从而计算轻组物质的比例. 所有样品研磨过 100 目筛,经过酸化处理后用 Elementarvario TOC 分析仪测定土壤 HFOC、LFOC 含量.

数据计算:

$$\text{HFOC 含量}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}) = \text{重组物质中土壤有机碳}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}) \times (\text{重组物质占土壤的质量分数}),$$

$$\text{LFOC 含量}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}) = \text{轻组物质中土壤有机碳}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}) \times (\text{轻组物质占土壤的质量分数}),$$

$$\text{LFOC 分配比例}(\%) = \text{LFOC 含量}/\text{SOC 含量} \times 100\%.$$

1.4 数据处理

用 SPSS26 对数据进行整理和初步统计分析,采用 Origin9.1 对数据进一步分析和绘图. 对高寒地区不同草地类型区和不同深度土壤各指标含量差异进行 LSD(Least-significant different) 多重比较分析和单因素方差分析(one-way ANOVA). 重、轻组有机碳与土壤理化性质及环境变量的相关分析采

用皮尔森(Pearson)双尾检验法.

2 结果

2.1 土壤变量与理化性质特征

研究区各采样点地上生物量最高为 690.08 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、最低为 141.60 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 地下生物量最高为 6 602.55 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、最低为 1 327.39 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 地上生物量大小依次为: 高寒草甸 > 高寒草原 > 高寒沼泽草甸, 地下生物量大小则与之相反, 相比于高寒草甸区, 高寒沼泽草甸和高寒草原区植物地下根系较为发达, 地下生物量较高, 地上生物量较低, 而高寒草甸区植物地上生物量较高, 地下生物量较低(表 1).

不同草地类型区之间表层(0~20 cm)土壤 pH、含水率、TC、SOC 和 TN 含量差异显著($p<0.05$), 变化范围分别为 7.21~8.40、27.04%~82.47%、28.25~111.85 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、22.58~105.12 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2.30~8.97 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2). pH 值总体在 7~9, 高寒沼泽草甸区的土壤 pH 值总体较其他研究区低, 存在明显差异($p<0.05$). 土壤电导率在各区域之间以及土壤深度之间差异不明显. 3 种草地类型区域水分含量大小依次为: 高寒沼泽草甸、高寒草原和高寒草甸, 含水率在各区域土壤深度间差异显著($p<0.05$), 均随土壤深度增加而递减. 高寒沼泽草甸区的土壤 TC、SOC 和 TN 均高于高寒草原和高寒草甸区, 高寒沼泽草甸地区 TC 含量土层间差异显著($p<0.05$). 各区域 SOC、TN 含量在土壤深度之间有明显差异($p<0.05$), 含量均随土壤深度增加而递减, 高寒沼泽草甸土壤 TN 含量土层间差异显著($p<0.05$). C/N 各区域之间以及土壤深度之间差异不明显.

土壤颗粒分布(图 2)表明, 各研究区土壤以粉粒和砂粒为主, 分别占土壤颗粒的 53.49% 和 38.53%, 黏粒占土壤颗粒的 7.95%. 不同草地类型区域的土壤黏粒含量差异并不显著, 但高寒沼泽草甸和高寒草甸区的土壤粉粒含量较高, 砂粒含量较低, 而高寒草原区的粉粒含量较低, 砂粒含量较高.

2.2 重、轻组有机碳含量垂直分布特征

如图 3 所示, 不同草地类型区土壤重、轻组有机碳含量均具有明显的垂直变化, 均随着土壤深度的增加而降低, 各区域 HFOC 含量均在 0~10 cm 层最高, 分别为 55.74 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、43.83 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、34.62 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高寒沼泽草甸区 HFOC 含量在 20~30 cm 层最低, 为 21.24 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高寒草原和高寒草甸区的 HFOC 含量均在 40~50 cm 层最低, 分别为 5.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、

表2 不同草地类型区土壤变量与理化性质特征

Table 2 Characteristics of soil variables and physicochemical properties in different grassland types

植被类型	土壤深度 (cm)	pH	电导率 ($s \cdot m^{-1}$)	含水率 (%)	总碳 TC ($g \cdot kg^{-1}$)	有机碳 SOC ($g \cdot kg^{-1}$)	总氮 TN ($g \cdot kg^{-1}$)	碳氮比 C/N
高寒沼泽 草甸	0~10	7.21±0.17 Ba	15.78±3.03 Aa	82.47±2.07 Aa	111.85±1.68 Aa	105.12±3.06 Aa	8.97±0.26 Aa	11.81±0.14 Aa
	10~20	7.50±0.16 Ba	11.33±1.87 Aa	56.73±7.05 Ab	68.68±6.63 Aa	59.44±3.10 Aa	4.72±0.40 Aa	12.39±1.05 Aa
	20~30	7.47±0.30 Ba	11.17±3.10 Aa	33.26±3.60 Ac	47.74±11.25 Ab	37.23±12.16 Ab	3.61±1.12 Ab	10.17±0.29 Aa
	30~40	7.62±0.32 Ba	10.90±0.17 Ba	27.88±1.68 Ac	38.40±11.46 Bb	28.46±13.29 Bb	2.64±1.29 Bb	11.45±1.52 Aa
	40~50	7.72±0.33 Ba	9.60±0.48 Ba	23.86±1.44 Ac	41.52±14.66 Ab	30.78±16.70 Ab	2.92±1.49 Ab	9.96±0.40 Aa
高寒草原	0~10	8.03±0.09 Ac	18.50±2.00 Aa	29.08±4.39 Ba	58.35±11.29 Ba	53.03±11.49 Ba	4.63±0.81 Ba	11.23±0.49 Aa
	10~20	8.40±0.05 Ab	12.71±0.82 Ab	33.05±6.01 Aa	28.25±2.55 Bb	22.58±2.63 Bb	2.30±0.20 Bb	9.74±0.30 Aa
	20~30	8.60±0.04 Aa	12.28±0.57 Ab	22.01±2.81 Aa	21.18±2.30 Ab	14.67±0.57 Ab	1.58±0.08 Ab	9.29±0.11 Aa
	30~40	8.72±0.03 Aa	11.73±0.27 Ab	20.33±0.77 Ba	20.35±3.24 Ab	11.60±0.86 Ab	1.31±0.09 Ab	8.86±0.06 Ab
	40~50	8.78±0.04 Aa	11.31±0.08 Ab	16.19±1.07 Bb	19.17±3.86 Ab	8.44±0.60 Ab	0.88±0.09 Ab	9.78±0.93 Aa
高寒草甸	0~10	7.84±0.17 Ac	18.63±2.27 Aa	36.12±2.80 Ba	59.41±8.11 Ba	53.75±9.21 Ba	5.29±0.63 Ba	9.94±0.66 Aa
	10~20	8.17±0.13 Ab	19.07±2.16 Aa	27.04±0.74 Bb	47.93±5.63 Aa	40.37±3.87 Aa	4.19±0.31 Aa	9.64±0.71 Aa
	20~30	8.40±0.12 Aa	19.29±2.86 Aa	22.29±1.98 Ab	43.03±4.47 Aa	28.70±3.76 Ab	3.11±0.31 Ab	9.16±0.54 Aa
	30~40	8.65±0.11 Aa	19.03±1.99 Aa	20.21±1.55 Ab	38.78±3.58 Aa	20.13±2.13 Ab	2.14±0.18 Ac	9.34±0.21 Aa
	40~50	8.73±0.05 Aa	23.01±4.87 Aa	18.80±1.14 Ac	37.95±4.27 Aa	18.08±3.23 Ac	1.86±0.31 Ac	9.66±0.09 Aa

注:同一列A、B表示不同草地类型区域同一土壤深度的平均值差异显著($p<0.05$)。同列中a、b表示同一草地类型不同土壤深度的平均值差异显著($p<0.05$)。

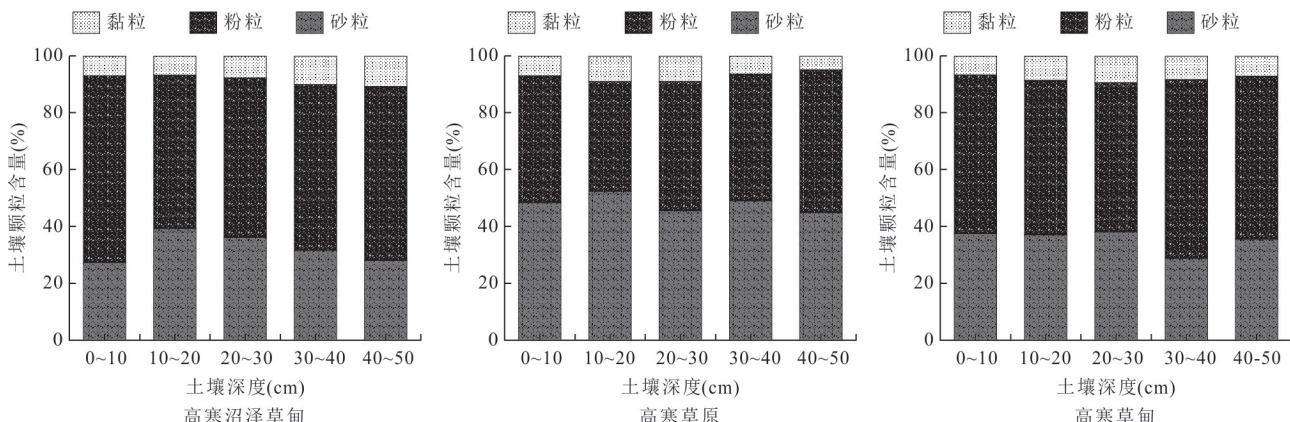


图2 不同草地类型区0~50 cm深度土壤颗粒组成

Fig. 2 Compositions of soil particles in 0–50 cm soil depth in different grassland types

10.13 $g \cdot kg^{-1}$ 表层(0~20 cm) LFOC 含量均高于底层(20~50 cm), 不同草地类型区表层(0~20 cm)的LFOC 含量占0~50 cm 总量的65.8%、77.8% 和70.0%。单因素方差分析表明(a,b表示同一草地类型不同土壤深度的平均值差异显著 $p<0.05$), 高寒沼泽草甸区 HFOC 和 LFOC 含量高于其他区域, 各区域间差异不明显($p<0.05, n=5$), 高寒草原区 HFOC 含量与高寒草甸区 HFOC 和 LFOC 含量均呈显著的垂直变化($p<0.05, n=5$)。

2.3 轻组有机碳分配比例垂直变化特征

土壤轻组有机碳占总有机碳的比例变化趋势如图4所示, 高寒沼泽草甸区 LFOC/SOC 值随土壤深度保持相对稳定, 其值在40.36%~50.81%, 高寒草原和高寒草甸区 LFOC/SOC 值随土层深度变化起伏较大, 分别在15.63%~58.55% 和20.66%~49.86%。各区域 LFOC/SOC 的平均值分别为47.3%、38.32% 和29.29%, 各区域 LFOC/SOC 值均在0~10 cm 层达到最高, 分别为50.67%、58.55% 和49.86%。LFOC/SOC 值均在30~40 cm 层最低,

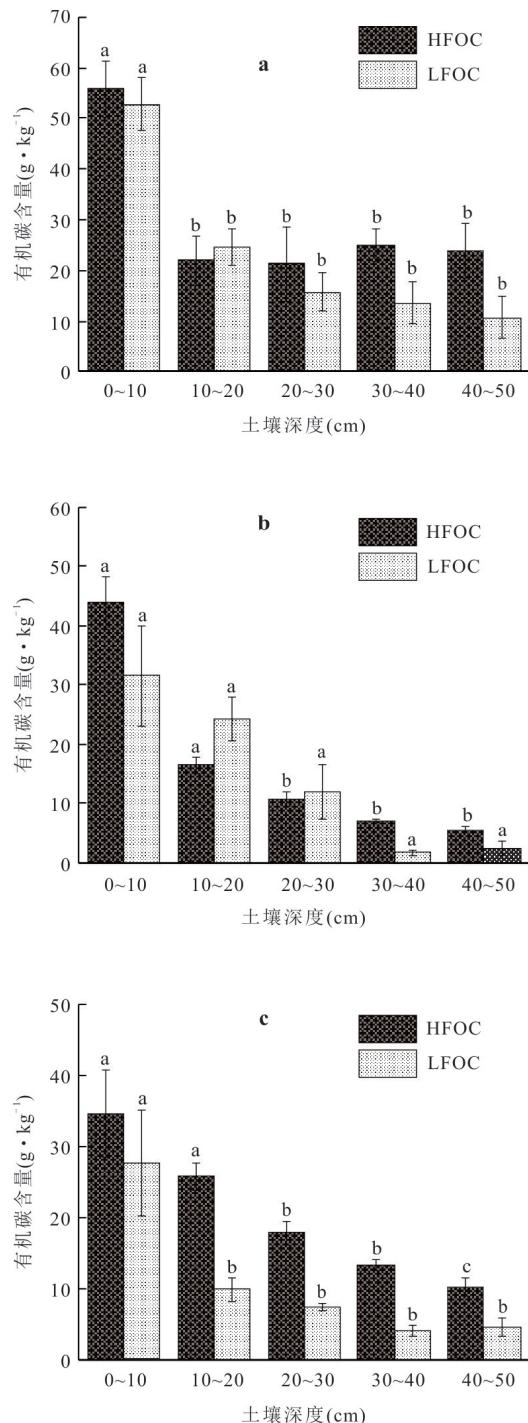


图3 不同草地类型区重、轻组有机碳含量垂直分布
Fig. 3 Vertical distribution of heavy and light fraction organic carbon in different grassland types
a.高寒沼泽草甸;b.高寒草原;c.高寒草甸

分别为 40.36%、15.63% 和 20.66%。单因素方差分析表明(a、b 表示同一草地类型不同土壤深度的平均值差异显著 $p < 0.05$)，高寒草甸区 LFOC/SOC 值在土层间存在明显的垂直变化($p < 0.05, n=5$)，其他区域 LFOC/SOC 值在土层间未达到显著

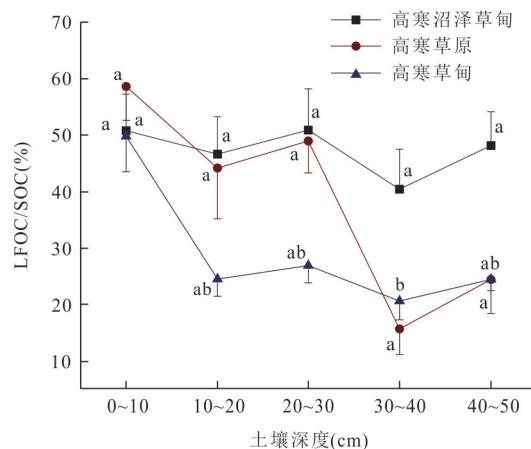


图4 不同草地类型区轻组有机碳分配比例变化

Fig. 4 Changes of distribution proportion of light fraction organic carbon in different grassland types

水平。

2.4 重、轻组有机碳与土壤变量间的相关性

如图 5 所示, HFOC 和 LFOC 含量与 TC、SOC、TN 和 C/N 之间呈极显著正相关($p < 0.01$)。HFOC 和 LFOC 与 pH 呈极显著负相关($p < 0.01$), 与含水率呈极显著正相关($p < 0.01$), HFOC 和 LFOC 与电导率、砂粒、粉粒和黏粒之间无显著相关性。TC、SOC 和 TN 与土壤深度之间呈极显著负相关($p < 0.01$), 含水率与土壤深度之间也呈显著负相关($p < 0.05$)。电导率与其他土壤变量相关性不显著。pH 和含水率与 HFOC、LFOC、TC、SOC、TN 含量和 C/N 间呈极显著相关($p < 0.01$)。TC 与粉粒含量之间呈显著正相关($p < 0.05$)。砂粒与粉粒含量之间呈极显著负相关($p < 0.01$)。土壤质地(砂粒、粉粒和黏粒)与其他理化性质相关性不显著。

3 讨论

3.1 高寒地区土壤变量与理化性质特征

高寒地区不同草地类型的植物群落组成和结构不同, 地上与地下生物量等植被特征差异显著, 其中, 高寒沼泽草甸区地下生物量最高, 可能是由于该区域土壤水分含量较高, 植被根系发达, 而高寒草甸区的植被长势较好, 植被高度和地上生物量较高, 与 Tang *et al.*(2015)对青藏高原 3 种草地类型的比较结果相似, 该研究发现高寒草甸的植被生物量和覆盖度高于高寒草原和荒漠草原。在本研究中, 不同草地类型土壤 pH 和含水率变化范围分别为 7.21~8.40 和 27.04%~82.47%, 在不同土层间与

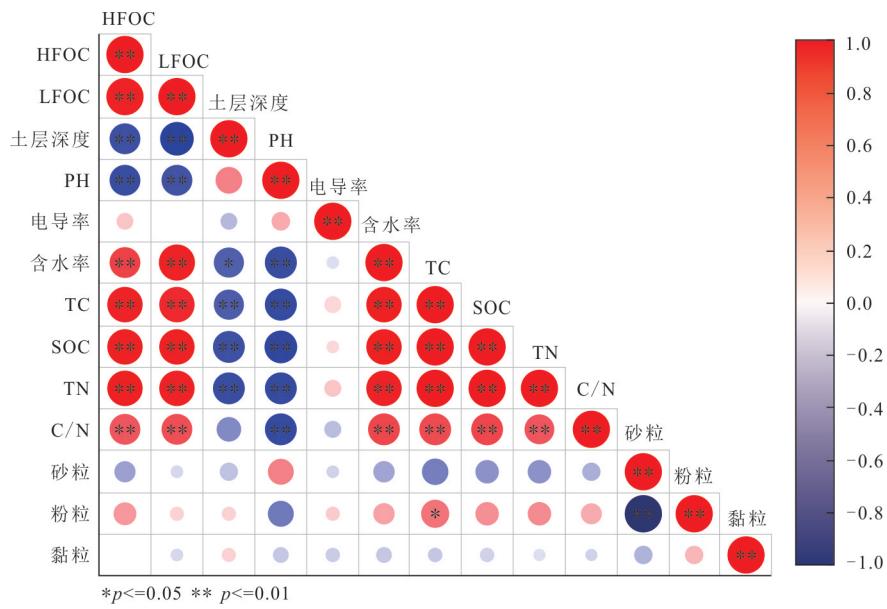


图5 重组有机碳、轻组有机碳与土壤变量间的相关性

Fig. 5 Correlations between heavy fraction organic carbon, light fraction organic carbon and soil variables

HFOC. 重组有机碳; LFOC. 轻组有机碳; TC. 总碳; SOC. 土壤有机碳; TN. 总氮; C/N. 碳氮比

土壤 TC、SOC、TN 和 C/N 等指标显著相关,这与 Liu *et al.* (2019)对青藏高原多年冻土区土壤的研究结果一致。而电导率在此研究中与各项指标无相关关系,其原因还需进一步研究调查。不同草地类型区域下,随着土层深度加深,土壤含水率、TC、SOC 和 TN(高爽等,2022)等指标有明显的垂直变化规律。在本研究中,同一草地类型区域,表层(0~20 cm)土壤中 TC、SOC 和 TN 等指标含量显著高于底层(20~50 cm)土壤,这可能是由于在高寒地区的低温条件下,其土壤有机质具有降解程度低、根系贡献高的特点(Jia *et al.*, 2019),同时,较高的土壤含水量会抑制土壤异养呼吸活性(Shi *et al.*, 2012),因此在土壤表层积累了大量的土壤有机质。这与 Jia *et al.* (2019)对高寒草原底层土壤碳动态的研究结果一致,在土壤的垂直剖面上,表层的 C、N 含量是高于底层的。土壤质地,即土壤的黏粒、粉粒和砂粒组成,是土壤重要的物理性质。本研究中,粉粒与 TC 含量之间呈显著正相关,与 SOC、TN 等指标间则无显著相关性,这与 Cao *et al.* (2016)对土壤质地与土壤理化性质的研究结果不一致,该研究表明,SOC 含量随着土壤粘粒和粉粒含量的增加而增加,可能是由于研究区土壤颗粒分布比较均匀。

3.2 高寒地区土壤重、轻组有机碳分布特征

重组和轻组物质是根据土壤密度进行划分的土壤组分,不同的研究有不同的密度标准(Meij-

boom, 1995)。轻组物质周转较快,有明显的季节性变化,这取决于植物凋落物输入的变化(Shang *et al.*, 2016)。本实验采用 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为分选密度,低于此密度的为轻组组分,高于此密度的为重组组分。本试验不同草地类型区域土壤表层重组物质含量变幅为 82.6%~88.4%,轻组物质含量变幅为 11.6%~17.8%,Wu *et al.* (2004)研究发现,0~20 cm 农田土壤轻组物质含量为 1.18%~3.76%,远低于本研究结果,这些差异可以归因于研究区海拔较高及独特的环境条件,例如低温、土壤质地、土壤含水量、植物凋落物及植被覆盖率,均是不稳定有机质含量的决定因素(Wu *et al.*, 2018)。

LFOC 被认为包括植物和动物残体,分解及周转迅速,有明显的季节变化,也是植物养分的重要来源。多个实验证实,LFOC 可以很好地预测总 SOC 的长期变化(Li *et al.*, 2018)。本研究中,不同草地类型区域土壤 HFOC 和 LFOC 含量在土层间具有明显的垂直变化,其分布特征受多种因素的影响,本研究结果表明 HFOC 和 LFOC 含量与土壤 pH、含水率、TC、SOC、TN 含量和 C/N 之间呈极显著相关性,这与吴晓东等(2018)对青藏高原南部多年冻土区土壤轻组有机质的研究结果相似,该研究表明,多年冻土区土壤轻组碳、氮含量与土壤含水率、容重、土壤颗粒及碳氮含量分布密切相关。HFOC 和 LFOC 含量与土壤颗粒组成未呈现显著

相关性,一般来说,细质土壤颗粒具有较好的持水能力,可以通过促进植物生长来加速土壤有机质的积累速率,LFOC 含量与土壤颗粒组成的相关分析还需进一步研究。土壤碳库的稳定程度是衡量其对气候变化的响应和土壤碳循环过程的重要内容,本研究中,土壤 HFOC 和 LFOC 含量大小依次为:高寒沼泽草甸>高寒草原>高寒草甸,这可能是高寒沼泽草甸区(3 900~4 100 m)海拔梯度较高,区域间植被类型发生变化,轻组有机质随海拔梯度增加而增多,且该地区土壤 C/N 值显著高于另外两个地区,土壤 C/N 值随深度的增加而降低,说明该地区土壤有机质在较深土壤中的分解程度较高,HFOC 在高寒草甸地区土壤 SOC 的占比较大,起着重要的碳汇作用,这与毛楠等(2022)对祁连山多年冻土区土壤甲烷通量的研究结果相似,该研究表明在海拔梯度上,高海拔地区的高寒沼泽草甸为重要的碳源,而中部高寒草原区及低部高寒草甸区是重要的碳汇。同时,不同草地类型研究区表层(0~20 cm)的 LFOC 含量与地下生物量呈极显著正相关,高寒沼泽草甸地下根系发达,表层土壤 LFOC 含量高达 52.69 g•kg⁻¹,与黄德青等(2011)的研究结果相似,该研究表明,地上凋落物和地下根系是土壤轻组碳的主要来源。而低于 20 cm 的土层,由于土壤中植物根系生物量大幅减少、土壤受植物凋落物的影响减弱,土壤 LFOC 含量急剧减少。

不同草地类型、不同土壤深度及土壤理化性质的差异,影响了土壤有机碳输入量,使总有机碳含量不同,进而影响了 LFOC 的分配比例(Giller *et al.*, 1996),使 LFOC/SOC 值在土壤剖面上表现出明显的层次性(Xie *et al.*, 2008),尽管土壤 LFOC 含量只占总 SOC 的小部分,但 LFOC 作为土壤不稳定碳库的重要组成部分,支持氮和磷等营养物质的生物地球化学循环(Zhang *et al.*, 2020)。本研究中,高寒沼泽草甸区 LFOC/SOC 值随土层深度保持相对稳定高寒草原和高寒草甸区 LFOC/SOC 值随土层深度变化起伏较大,与吴建国等(2002)对不同土地利用方式下土壤有机碳的分配结果不同,该研究表明 LFOC 分配比例随土层深度的增加而递减。高寒草原和高寒草甸区土壤 LFOC/SOC 随土层的变化起伏较大,而高寒沼泽草甸区 LFOC/SOC 值随土层深度保持相对稳定,而各研究区 SOC 含量均呈显著的垂直变化,说明不同草地类型对不同土层 LFOC 含量及其分配的影响不同,其中高寒沼泽草

甸区土壤 LFOC 分配比例较高,土壤有机质在深层土壤中的分解程度较高,可能是由于该地区海拔较高,土壤水分含量高,相比于其他研究区易受环境条件影响,而高寒草原和高寒草甸地区土壤表层 LFOC/SOC 值较高,而底层 LFOC/SOC 值较低,说明该区域底层土壤有机质分解程度较弱。土壤有机质分解潜力受气温和降水等影响,本研究未涉及与以上环境因子做相关分析,仍需进一步综合研究。

4 结论

对祁连山的 3 种草地类型土壤碳组分研究发现,在 0~50 cm 土壤中,HFOC 和 LFOC 含量均随土层呈明显的垂直变化,而 LFOC/SOC 值变化趋势不明显。LFOC 含量在不同草地类型区大小依次为:高寒沼泽草甸>高寒草原>高寒草甸,即不同草地类型区 0~50 cm 土壤有机碳库稳定程度大小依次为:高寒草甸>高寒草原>高寒沼泽草甸。土壤 pH、含水率、TC、SOC、TN 含量和 C/N 值与土壤 HFOC、LFOC 含量呈极显著相关($p<0.01$),地下生物量对土壤有机碳组分的影响主要体现在表层 0~20 cm。各区域 LFOC/SOC 的平均值分别为 47.3%、38.3% 和 29.3%,高寒草甸区 LFOC/SOC 值在土层间存在明显的垂直变化,其他区域 LFOC/SOC 值在土层间未达到显著水平,即不同草地类型对不同土层 LFOC 含量及其分配的影响不同。综上所述,高寒地区土壤有机碳库稳定程度受草地类型、土壤理化性质及环境变量影响,而土壤 pH、含水率、TC、SOC、TN 含量与 C/N 值是影响研究区草地生态系统土壤有机碳库组成和稳定程度的主要因素。

References

- Cao, H. C., Chen, R. R., Wang, L. B., et al., 2016. Soil pH, Total Phosphorus, Climate and Distance are the Major Factors Influencing Microbial Activity at a Regional Spatial Scale. *Scientific Reports*, 6(1): 25815. <https://doi.org/10.1038/srep25815>
- Chaopricha, N. T., Marín-Spiotta, E., 2014. Soil Burial Contributes to Deep Soil Organic Carbon Storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 69: 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.011>
- Chen, L. Y., Liang, J. Y., Qin, S. Q., et al., 2016. Determinants of Carbon Release from the Active Layer and Permafrost Deposits on the Tibetan Plateau. *Nature*

- Communications, 7: 13046. <https://doi.org/10.1038/ncomms13046>
- Dai, G. H., Ma, T., Zhu, S. S., et al., 2018. Large-Scale Distribution of Molecular Components in Chinese Grassland Soils: The Influence of Input and Decomposition Processes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(1): 239—255. <https://doi.org/10.1002/2017jg004233>
- Dixon, A. P., Faber-Langendoen, D., Josse, C., et al., 2014. Distribution Mapping of World Grassland Types. *Journal of Biogeography*, 41(11): 2003—2019. <https://doi.org/10.1111/jbi.12381>
- Fang, J. Y., Geng, X. Q., Zhao, X., et al., 2018. How Many Areas of Grasslands are There in China? *Chinese Science Bulletin*, 63(17): 1731—1739 (in Chinese).
- Gao, S., Su, C. L., Xie, X. J., et al., 2022. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrogen in Unsaturated Zone in Salinized Area of Hetao Plain. *Earth Science*, 47(2): 568—576 (in Chinese with English abstract).
- Giller, G.C., 1996. Carbon Turnover ($\delta^{13}\text{C}$) and Nitrogen Mineralization Potential of Particulate Light Soil Organic Matter after Rainforest Clearing. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(12): 1555—1567. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(96\)00264-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(96)00264-7)
- Huang, D.Q., Yu, L., Zhang, Y.S., et al., 2011. Above-Ground Biomass and Its Relationship to Soil Moisture of Natural Grassland in the Northern Slopes of the Qilian Mountains. *Acta Prataculturae Sinica*, 20(3): 20—27 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Q.M., Lü, M.K., Nie, Y.Y., et al., 2020. Characteristics of Light Fraction Organic Matter in Surface Soil of Different Altitude Forests in Wuyi Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 40(17): 6215—6222 (in Chinese with English abstract).
- Janzen, H. H., Campbell, C. A., Brandt, S. A., et al., 1992. Light-Fraction Organic Matter in Soils from Long-Term Crop Rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 56(6): 1799—1806. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600060025x>
- Jia, J., Cao, Z. J., Liu, C. Z., et al., 2019. Climate Warming Alters Subsoil But not Topsoil Carbon Dynamics in Alpine Grassland. *Global Change Biology*, 25(12): 4383—4393. <https://doi.org/10.1111/gcb.14823>
- Li, N., Wang, G.X., Yang, Y., et al., 2011. Plant Production, and Carbon and Nitrogen Source Pools, are Strongly Intensified by Experimental Warming in Alpine Ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(5): 942—953. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.009>
- Li, Y. Y., Dong, S. K., Wen, L., et al., 2013. The Effects of Fencing on Carbon Stocks in the Degraded Alpine Grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Environmental Management*, 128: 393—399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.058>
- Li, J., Wen, Y. C., Li, X. H., et al., 2018. Soil Labile Organic Carbon Fractions and Soil Organic Carbon Stocks as Affected by Long-Term Organic and Mineral Fertilization Regimes in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 175: 281—290. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.008>
- Liao, Y., Yang, Z. F., Xia, X. Q., et al., 2011. Research on Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Different Active Organic Carbon Fractions of Qinghai-Tibet Plateau Permafrost. *Earth Science Frontiers*, 18(6): 85—93 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. L., Greaver, T. L., 2010. A Global Perspective on Belowground Carbon Dynamics under Nitrogen Enrichment. *Ecology Letters*, 13(7): 819—828. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01482.x>
- Liu, G. M., Zhang, X. L., Wu, T. H., et al., 2019. Seasonal Changes in Labile Organic Matter as a Function of Environmental Factors in a Relict Permafrost Region on the Qinghai-Tibetan Plateau. *CATENA*, 180: 194—202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.026>
- Ma, T., Dai, G. H., Zhu, S. S., et al., 2019. Distribution and Preservation of Root- and Shoot-Derived Carbon Components in Soils across the Chinese-Mongolian Grasslands. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(2): 420—431. <https://doi.org/10.1029/2018jg004915>
- Mao, N., Liu, G. M., Li, L. S., et al., 2022. Methane Fluxes and Their Relationships with Methane-Related Microbes in Permafrost Regions of the Qilian Mountains. *Earth Science*, 47(2): 556—567 (in Chinese with English abstract).
- Meijboom, F. W., 1995. Density Fractionation of Soil Macro-organic Matter Using Silica Suspensions. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(8): 1109—1111. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00028-d](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00028-d)
- Mu, C. C., Zhang, T. J., Zhao, Q., et al., 2016. Soil Organic Carbon Stabilization by Iron in Permafrost Regions of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geophysical Research Letters*, 43(19): 10286—10294. <https://doi.org/10.1002/2016gl070370>

- 2016gl070071
- Shang, W., Wu, X.D., Zhao, L., et al., 2016. Seasonal Variations in Labile Soil Organic Matter Fractions in Permafrost Soils with Different Vegetation Types in the Central Qinghai-Tibet Plateau. *CATENA*, 137: 670–678. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.012>
- Shi, Y., Baumann, F., Ma, Y., et al., 2012. Organic and Inorganic Carbon in the Topsoil of the Mongolian and Tibetan Grasslands: Pattern, Control and Implications. *Biogeosciences*, 9(6): 2287–2299. <https://doi.org/10.5194/bg-9-2287-2012>
- Spawn, S. A., Sullivan, C. C., Lark, T. J., et al., 2020. Harmonized Global Maps of above and Belowground Biomass Carbon Density in the Year 2010. *Scientific Data*, 7(1): 112. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0444-4>
- Tang, L., Dong, S. K., Liu, S. L., et al., 2015. The Relationship between Soil Physical Properties and Alpine Plant Diversity on Qinghai-Tibet Plateau. *Eurasian Journal of Soil Science (EJSS)*, 4(2): 88. <https://doi.org/10.18393/ejss.31228>
- Tao, L.H., 2016. The Dynamic of Ecological Parameters of Alpine Meadow and Its Relationship with Altitude (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. W., Wang, Q., Zhao, L., et al., 2016. Mapping the Vegetation Distribution of the Permafrost Zone on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, 13(6): 1035–1046. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3485-y>
- Wu, J.G., Zhang, X.Q., Wang, Y.H., et al., 2002. The Effects of Land Use Changes on the Distribution of Soil Organic Carbon in Physical Fractionation of Soil. *Scientia Silvae Sinicae*, 38(4): 19–29 (in Chinese with English abstract).
- Wu, T.Y., Jeff, J.S., Li, F.M., et al., 2004. Influence of Cultivation and Fertilization on Total Organic Carbon and Carbon Fractions in Soils from the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 77(1): 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.10.002>
- Wu, X.D., Zhao, L., Hu, G.J., et al., 2018. Permafrost and Land Cover as Controlling Factors for Light Fraction Organic Matter on the Southern Qinghai-Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 613/614: 1165–1174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.052>
- Xie, J.S., Yang, Y.S., Xie, M.S., et al., 2008. Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Matter of Light Fraction in Eroded Deroded Red Soil in Subtropics of China. *Acta Pedologica Sinica*, 29(4): 534–536. doi: 10.1097/00005373-198904000-00024
- Yang, Y. H., Fang, J. Y., Tang, Y. H., et al., 2008. Storage, Patterns and Controls of Soil Organic Carbon in the Tibetan Grasslands. *Global Change Biology*, 14(7): 1592–1599. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01591.x>
- Yang, Y., Chen, R.S., Ji, X.B., 2007. Variations of Glaciers in the Yenugou Watershed of Heihe River Basin from 1956 to 2003. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(1): 100–106 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F., Fan, C.Y., Mu, C.C., et al., 2021. Influences of Snow Cover on the Thermal State of the Active Layer in the Upper Reaches of the Heihe River in the Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(6): 1628–1640 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., Cao, Z.P., Hu, C.J., 2011. Soil Organic Carbon Fractionation Methods and Their Applications in Farmland Ecosystem Research: A Review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(7): 1921–1930 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. G., Chen, X., Xu, Y. J., et al., 2020. Soil Labile Organic Carbon Fractions and Soil Enzyme Activities after 10 Years of Continuous Fertilization and Wheat Residue Incorporation. *Scientific Reports*, 10: 11318. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68163-3>
- Zhang, L.M., Xu, M.G., Lou, Y.L., et al., 2014. Soil Organic Carbon Fractionation Methods. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (4): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 方精云, 耿晓庆, 赵霞, 等, 2018. 我国草地面积有多大? 科学通报, 63(17): 1731–1739.
- 高爽, 苏春利, 谢先军, 等, 2022. 河套平原盐渍化地区非饱和带氮的分布特征及影响因素. 地球科学, 47(2): 568–576.
- 黄德青, 于兰, 张耀生, 等, 2011. 祁连山北坡天然草地地上生物量及其与土壤水分关系的比较研究. 草业学报, 20(3): 20–27.
- 黄桥明, 吕茂奎, 聂阳意, 等, 2020. 武夷山不同海拔森林表层土壤轻组有机质特征. 生态学报, 40(17): 6215–6222.
- 廖艳, 杨忠芳, 夏学齐, 等, 2011. 青藏高原冻土土壤呼吸温度敏感性和不同活性有机碳组分研究. 地学前缘, 18

- (6): 85—93.

毛楠, 刘桂民, 李莉莎, 等, 2022. 祁连山多年冻土区甲烷通量与甲烷微生物群落组成的关系. 地球科学, 47(2): 556—567.

陶林浩, 2016. 海拔对高寒草甸生态参数季节性变化的影响: 以野牛沟流域为例(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.

吴建国, 张小全, 王彦辉, 等, 2002. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响. 林业科学, 38(4): 19—29.

阳勇, 陈仁升, 吉喜斌, 2007. 近几十年来黑河野牛沟流域的冰川变化. 冰川冻土, 29(1): 100—106.

张凤, 范成彦, 牟翠翠, 等, 2021. 积雪对祁连山区黑河上游活动层热状态的影响研究. 冰川冻土, 43(6): 1628—1640.

张国, 曹志平, 胡婵娟, 2011. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用. 应用生态学报, 22(7): 1921—1930.

张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等, 2014. 土壤有机碳分组方法概述. 中国土壤与肥料, (4): 1—6.

《地球科学》

2024年5月 第49卷 第5期 要目预告