

DOI: 10.5846/stxb201910172176

潘蕊蕊, 李小雁, 胡广荣, 石芳忠, 魏俊奇, 丁梦凯, 王雷. 青海湖流域季节性冻土区坡面土壤有机碳分布特征及其影响因素. 生态学报, 2020, 40(18): 6374-6384.

Pan R R, Li X Y, Hu G R, Shi F Z, Wei J Q, Ding M K, Wang L. Characteristics of soil organic carbon distribution and its controlling factors on hillslope in seasonal frozen area of Qinghai Lake Basin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6374-6384.

青海湖流域季节性冻土区坡面土壤有机碳分布特征及其影响因素

潘蕊蕊^{1,2}, 李小雁^{1,2,*}, 胡广荣¹, 石芳忠¹, 魏俊奇¹, 丁梦凯¹, 王 雷³

1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 北京 100875

3 青海省三角城种羊场, 海北 812300

摘要:以高寒半干旱区青海湖流域季节性冻土为研究对象,通过调查采样和室内分析,研究了坡向和坡位对不同深度土壤有机碳含量分布的影响。结果表明:阴、阳坡有机碳含量均随土壤深度增加而下降,但阳坡下降的幅度(64%)明显高于阴坡(44%)。阴坡土壤有机碳平均含量为 81.99 g/kg,大于阳坡(61.84 g/kg);不同坡位,土壤有机碳分布特征因坡向而异,其中阴坡土壤有机碳平均含量表现为坡下(89.60 g/kg)>坡中(86.52 g/kg)>坡上(69.87 g/kg),而阳坡土壤有机碳平均含量表现为坡上(65.71 g/kg)>坡下(61.42 g/kg)>坡中(58.39 g/kg)。此外,坡位对不同深度土壤有机碳的影响程度在不同坡向也存在差异。阴坡坡位因子对深层土壤有机碳影响显著,而阳坡坡位因子对浅层土壤有机碳影响显著。一般线性模型结果表明,坡面土壤有机碳含量主要受土层和坡向的影响,可解释 74.52%的变异性。

关键词:青海湖流域;季节性冻土区;土壤有机碳;坡向;坡位

Characteristics of soil organic carbon distribution and its controlling factors on hillslope in seasonal frozen area of Qinghai Lake Basin

PAN Rui^{1,2}, LI Xiaoyan^{1,2,*}, HU Guangrong¹, SHI Fangzhong¹, WEI Junqi¹, DING Mengkai¹, WANG Lei³

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Sanjiaocheng Sheep Breeding Farm of Qinghai Province, Haibei 812300, China

Abstract: The seasonally frozen ground in Qinghai Lake Basin in alpine and semi-arid region was studied in this paper. The effects of slope aspects and positions on distribution of soil organic carbon (SOC) content at different depths were studied by means of field investigation, sample collection, and lab analysis. The results showed that the SOC content of both shady and sunny slopes decreased with the increase of soil depths, but the decrease range of the sunny slope (64%) was significantly higher than that of the shady slope (44%). The average SOC content on the shady slope was 81.99 g/kg, higher than that of the sunny slope (61.84 g/kg); the distribution characteristics of SOC content in different slope positions varied with slope aspects. On the shady slope, the average SOC content showed a trend of lower slope (89.60 g/kg) > middle slope (86.52 g/kg) > upper slope (69.87 g/kg); while on the sunny slope, the average SOC content tended to be upper slope (65.71 g/kg) > lower slope (61.42 g/kg) > middle slope (58.39 g/kg). In addition, the effect of slope positions on SOC content at different depths also varied in different slope aspects. The shady slope factor had a significant

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0306);国家自然科学基金项目(41730854)

收稿日期:2019-10-17; 网络出版日期:2020-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlyli@bnu.edu.cn

effect on SOC content at deep soil layers, while the sunny slope factor had a significant effect on SOC content at shallow soil layers. The results of general linear model showed that the SOC content in slopes was mainly affected by soil depths and slope aspects, which could explain 74.52% variability of SOC content.

Key Words: Qinghai Lake Basin; seasonally frozen area; soil organic carbon; slope aspect; slope position

土壤是地球表层系统最大的碳库,是陆地碳循环的关键组成部分^[1-2]。有机碳作为土壤碳库中对全球气候变化敏感的主要因子,其较小的变化将会引起大气 CO₂浓度的大幅改变^[3-4]。土壤有机碳含量变化受多因素综合影响,包括气候、植被、地形和土地利用方式等^[5-8]。坡面是最基本的地貌单元^[9],坡向和坡位通过控制水分和光照因子在坡面上的分布,改变局地水热条件,从而形成不同的植被及土壤类型,影响土壤有机碳的输入与矿化^[11-12]。目前关于坡面土壤有机碳的分布特征已有较多的研究,但主要集中在低山丘陵区^[13-15]、黄土高原区^[8,16]、喀斯特地区^[17-18]、东北黑土区^[19]和部分祁连山草原草甸带^[20-22]等。综合已有研究发现不同气候区坡面土壤有机碳在不同坡向和坡位的分布具有很大异质性。大部分研究认为在同一坡位不同坡向上,有机碳分布特征一般表现为阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡^[16,21],但也有研究发现川西山地小流域由于热量的限制,其阳坡有机碳含量稍高于阴坡^[23];另外,在同一坡向不同坡位上,有机碳分布特征一般表现为下坡位>中坡位>上坡位^[12-13],但也有研究发现台湾南部低地上坡位由于生物量高、凋落物分解率低等原因,其有机碳含量大于下坡位^[24]。魏孝荣和邵明安^[25]通过对黄土高原丘陵沟壑区不同坡位土壤有机碳含量的研究表明,坡位对有机碳分布的影响还与土壤侵蚀和水土流失相联系,土壤有机碳易随坡面物质和坡地径流发生坡面再分布。这与陆银梅^[26]、花可可等^[27]在南方丘陵区坡地有机碳分布的研究结果一致。

目前对青藏高原高海拔地区坡面有机碳分布的研究仍然相对较少,例如王根绪等^[28]研究了青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义,发现青藏高原有机碳储量占我国有机碳储量的 23.44%;马素辉等^[29]研究了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的分布特征;李娜等^[30]在青藏高原腹地的风火山地区模拟了增温对高寒草甸土壤有机碳含量变化的影响;牟翠翠等^[31]比较了多年冻土区不同海拔活动层内的碳储量。以上研究揭示了青藏高原高寒地区有机碳储量、不同土地利用/植被覆盖下土壤有机碳分布、碳库变化趋势等特点,且集中在多年冻土区。高寒地区阴、阳坡由于水热条件的差异,分布有不同的植被和土壤类型^[10,32];同时在季节性冻土融化期,阴、阳坡存在不同的产流模式^[33]。Hu 等^[33]发现青海湖流域阴坡以壤中流为主,占总径流量的 94.5%;阳坡以地表径流为主,占总径流量的 97.9%。此外,季节性冻融作用还会引起土壤的上下蠕动、植被根系的破坏和土壤碳的释放^[34]。在这多种因素影响下,季节性冻土区土壤有机碳的空间分布特征较为复杂,不同坡向、坡位的不同深度土壤有机碳如何分布?其控制因子都还不明确,亟需深入研究。因此,本研究选取青海湖流域季节性冻土区阴、阳坡土壤为研究对象,利用实地观测和取样分析数据,分析坡面不同坡向、坡位土壤有机碳的分布特征及其影响因素,旨在为高寒季节性冻土区土壤碳水过程及土壤碳库研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域位青藏高原东北部(图 1),地处 36°15′—38°20′N,97°50′—101°20′E,东西长 106 km,南北宽 63 km,周长 360 km,海拔 3194—5174 m,流域面积为 29661 km²。流域属于高寒半干旱气候,常年较低的平均温度限制了土壤有机质的分解,造成了土壤碳的大量累积^[35]。流域内广泛分布着多年冻土(12748 km²)和季节性冻土(12651 km²),是世界上低纬度高海拔冻土集中分布区^[36-37]。随着全球气候变暖,多年冻土发生退化^[38],逐渐向季节性冻土转化。研究区位于青海湖第二大入湖河流—沙柳河流域的支流上游,处于河谷东侧,海拔高度介于 3565—3716 m,海拔落差 151 m,地理坐标为 37°25′N,100°15′E,属于季节性冻土区;据刚察县气象观测资料显示,该流域多年平均气温为 -0.5℃,极端高温为 25℃,极端低温为 -31℃,多年平均降水

量为 370.3 mm,主要集中在 6—9 月份,年蒸发量为 607.4 mm^[39]。根据地形特点,将本研究区划分为阴坡、阳坡和沟底 3 种地形单元;流域内植被覆盖情况良好,植被类型具有明显的山地特征。其中阴坡植被类型为高寒灌丛,优势种为毛枝山居柳灌丛和金露梅灌丛;阳坡植被类型为高寒草甸,优势种为高山嵩草和矮嵩草。

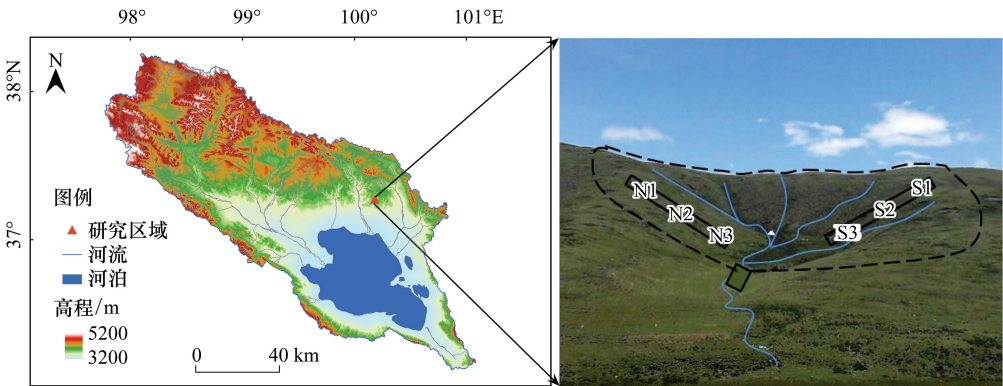


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

S1:阴坡上 Upper position on the shady slope;S2:阴坡中 Middle position on the shady slope;S3:阴坡下 Lower position on the shady slope;N1:阳坡上 Upper position on the sunny slope;N2:阳坡中 Middle position on the sunny slope;N3:阳坡下 Lower position on the sunny slope

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

本研究选择一个集水区的两个坡面作为研究区,通过坡面实地调查,按照不同坡向(阴坡、阳坡)和坡位(坡上、坡中、坡下)选择六个点进行采样,分别是 S1、S2、S3、N1、N2、N3(图 1)。阳坡土壤类型为高山草甸土,土层较薄,0—10 cm 为草毡层(As),10—25 cm 为腐殖质层(O),25—50 cm 为淋溶淀积层(AB),50 cm 以下为岩石层;阴坡土壤类型为亚高山草甸土,土层厚度大约为 70 cm,0—13 cm 为草毡层(As),13—40 cm 为腐殖质层(O),40—70 cm 为淋溶淀积层(AB),70 cm 以下出现岩石。阴、阳坡统一采样深度为 0—10、10—20、20—30、30—50 cm,分别于 2018 年 7、8、9、10 月份用土钻各采集一次,共获取 96 个土壤样品,以测土壤有机碳和含水量。另外,在每个样点附近各选择 3 个 1 m×1 m 的样方,齐地剪取样方内所有植物以计算地上生物量。样点基本信息如表 1 所示,其中年均温、饱和导水率和坡地径流引自 Hu 等的坡面水文观测数据^[33]。

表 1 采样点基本信息

Table 1 Basic characteristics of sample plots

编号 Number	样点 Sample	海拔 Altitude/m	地上生物量 Aboveground biomass/ (g/m ²)	年均温 Mean annual temperature/ ℃	含水量 Soil water content/%	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/ (mm/min)	坡长 Slope length/m	坡度 Slope degree/(°)	地表径流量 Surface flow/mm	壤中流量 Subsurface flow/mm	总径流量 Total flow/mm
N1	阳坡上	3686	128.77	4.2	54.85	0.69	70	35	0.47	0.1	0.57
N2	阳坡中	3650	120.6	—	42.03	0.61					
N3	阳坡下	3619	207.29	6.6	39.5	0.75					
S1	阴坡上	3686	210.81	2.5	57.25	0.42	60	30	0.24	5.06	5.3
S2	阴坡中	3650	449.25	—	68.31	0.54					
S3	阴坡下	3619	511.44	2.7	73.99	0.21					

S1:阴坡上 Upper position on the shady slope;S2:阴坡中 Middle position on the shady slope;S3:阴坡下 Lower position on the shady slope;N1:阳坡上 Upper position on the sunny slope;N2:阳坡中 Middle position on the sunny slope;N3:阳坡下 Lower position on the sunny slope

1.2.2 样品处理与分析

土壤样品带回实验室后立即利用烘干法(105℃)测定土壤含水量,然后将测定土壤有机碳的土壤置于通风室内自然风干。经自然风干后的土壤挑去枯枝落叶、根系和砾石,研磨过 0.149 mm 筛,装袋备用。取 35 mg 样品放入银舟内,加 25%磷酸,待反应完全后,置于 80℃烘箱 4 小时。将去除无机碳后的样品,利用总有机碳分析仪(vario TOC select)上机测定土壤有机碳含量,并采用国家标准土壤样品作质量控制。用刈割法获取地上生物量,将植物放入烘箱内,先 105℃杀青 30 min,然后把烘箱的温度降到 65℃,烘干至恒重,称重。

1.2.3 数据处理与统计分析

利用 Excel 软件进行数据预处理后,用 SPSS 24.0 对 7、8、9、10 四个月的有机碳数据进行方差分析,结果表明差异不显著,因此将四个月数据一起统计分析。首先按照不同深度、不同坡向坡位对土壤有机碳进行描述性统计,统计特征包括极值、均值、标准差、变异系数、K-S 检验结果等。然后采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同坡向和坡位下的土壤有机碳各层间的差异。最后用一般线性模型(GLM)的方差成分分析计算了各因子及其交互作用对土壤有机碳含量变异性的贡献^[16]。所有图采用 Origin 8.5 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同深度土层的土壤有机碳分布

将阴坡、阳坡所有样点土壤有机碳数据按照不同深度进行统计,得到研究区不同土层土壤有机碳分布特征(表 2)。由表 2 可知,研究区 0—10、10—20、20—30、30—50 cm 土层平均有机碳含量分别为 102.41、77.78、61.02、46.47 g/kg,所有土层平均有机碳含量为 71.92 g/kg,总体水平较高。随土壤深度增加,土壤有机碳含量呈下降趋势,且各土层差异显著($P<0.05$)。下降幅度达到 55%,这表明该区域植被和地形对有机碳影响显著的深度至少达到 50 cm。变异系数 CV 的大小决定着随机变量的变异程度,即决定土壤有机碳空间差异性的。一般认为 $CV\leq 15\%$ 时为弱变异性, $16\%\leq CV\leq 35\%$ 时为中等变异性, $CV\geq 36\%$ 时为强变异性^[40]。由表 2 可以看出,该区域 0—10、10—20、20—30 cm 土壤有机碳为中等变异,30—50 cm 土壤有机碳为高度变异。

表 2 不同土层土壤有机碳统计特征

Table 2 Statistical characteristics of soil organic carbon in different soil layers

土层 Soil depth/cm	样本数 Samples	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	K-S 检验 Kolmogorov- Smirnov test	分布类型 Distribution type
0—10	24	86.00	157.21	102.41a	15.85	0.16	0.197	正态分布
10—20	24	48.86	134.77	77.78b	19.56	0.25	0.841	正态分布
20—30	24	38.48	101.15	61.02c	15.80	0.25	0.904	正态分布
30—50	24	23.44	83.11	46.47d	17.40	0.38	0.586	正态分布

$n=96$; 不同小写字母表示不同土层土壤有机碳含量差异显著($P<0.05$)

2.2 不同坡向土壤有机碳分布

通过对不同坡向土壤有机碳进行统计分析可知(表 3),阴坡土壤有机碳含量在 43.55—157.21 g/kg 之间,平均有机碳含量为 81.99 g/kg,有机碳含量变异系数为 29%,属于中等变异。阳坡土壤有机碳含量在 23.44—129.09 g/kg 之间,平均有机碳含量为 61.84 g/kg,有机碳含量变异系数为 43%,属于高度变异。

由不同坡向土壤有机碳分布图(图 2)可看出,随土壤深度增加,阴坡和阳坡土壤有机碳均呈下降趋势,且各土层差异显著($P<0.05$)。但阴坡和阳坡降低幅度不同,阴坡降低幅度为 44%,阳坡降低幅度达到 64%。同一土层深度,不同坡向土壤有机碳含量均表现为阴坡大于阳坡。

表 3 不同坡向土壤有机碳统计特征

Table 3 Statistical characteristics of soil organic carbon in different slope aspects

坡向 Slope aspect	样本数 Samples	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	K-S 检验 Kolmogorov-Smirnov test	分布类型 Distribution type
阴坡 Shady slope	48	43.55	157.21	81.99	23.71	0.29	0.973	正态分布
阳坡 Sunny slope	48	23.44	129.09	61.84	26.35	0.43	0.297	正态分布

n = 96

2.3 不同坡位土壤有机碳分布

阴坡不同坡位土壤有机碳统计特征如表 4 所示,坡上、坡中、坡下有机碳含量分别在 43.55—108.35、46.16—157.21、62.94—119.73 g/kg,平均有机碳含量分别为 69.87、86.52、89.60 g/kg,即坡下>坡中>坡上 ($P<0.05$);有机碳含量变异系数分别为 30%、33%、19%,均属于中等变异。

由阴坡不同坡位土壤有机碳分布(图 3)可看出,同一坡位,不同深度土壤有机碳含量均表现为浅层大于深层,且各土层间差异性显著 ($P<0.05$);同一深度,不同坡位土壤有机碳含量均表现为坡下和坡中大于坡上,但在各深度不同坡位的差异性不同。其中,0—10 cm 和 10—20 cm 土层各坡位差异性不显著 ($P>0.05$),20—30 cm 和 30—50 cm 土层坡上与坡中、坡下差异显著 ($P<0.05$)。上述结果表明,阴坡坡位对不同土层土壤有机碳含量影响程度不同,对深层土壤有机碳的影响要大于浅层。

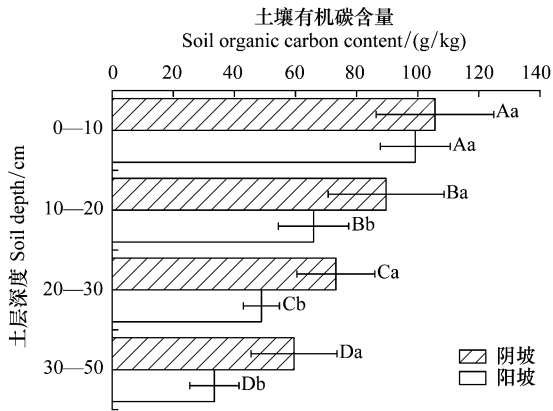


图 2 不同坡向土壤有机碳分布特征

Fig. 2 Characteristics of soil organic carbon distribution in different slope aspects

图中不同大写字母表示同一坡向不同深度土壤有机碳含量差异显著 ($P<0.05$),不同小写字母表示同一深度不同坡向土壤有机碳含量差异显著 ($P<0.05$)

表 4 阴坡不同坡位土壤有机碳统计特征

Table 4 Statistical characteristics of soil organic carbon in different slope positions on shady slope

坡位 Slope position	样本数 Samples	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	K-S 检验 Kolmogorov-Smirnov test	分布类型 Distribution type
坡上 Upper slope	16	43.55	108.35	69.87b	20.62	0.30	0.906	正态分布
坡中 Middle slope	16	46.16	157.21	86.52a	28.27	0.33	0.626	正态分布
坡下 Lower slope	16	62.94	119.73	89.60a	17.22	0.19	0.984	正态分布

n = 48; 不同小写字母表示不同坡位土壤有机碳含量差异显著 ($P<0.05$)

阳坡不同坡位土壤有机碳统计特征如表 5 所示,坡上、坡中、坡下有机碳含量分别在 27.86—98.92、24.59—96.77、23.44—129.09 g/kg。平均有机碳含量分别为 65.71、58.39、61.42 g/kg,即坡上>坡下>坡中,差异不显著 ($P>0.05$);有机碳含量变异系数分别为 33%、41%、54%,其中坡上属于中等变异,坡中和坡下属于高度变异。

由阳坡不同坡位土壤有机碳分布(图 4)可看出,同一坡位,不同深度土壤有机碳含量均表现为浅层大于深层,且各土层间差异性显著 ($P<0.05$);同一深度,不同坡位土壤有机碳含量差异性不同。其中,10—20、

20—30、30—50 cm 土层的有机碳含量均表现为坡上>坡中>坡下,而 0—10 cm 土层的有机碳含量为坡上<坡中<坡下,与阳坡各坡位平均有机碳分布特征不符,这可能是因为阳坡表层土壤有机碳在坡面易发生搬运与再分布。上述结果表明,阳坡坡位对不同土层土壤有机碳含量影响程度不同,对浅层土壤有机碳的影响要大于深层。

表 5 阳坡不同坡位土壤有机碳统计特征								
Table 5 Statistical characteristics of soil organic carbon in different slope positions on sunny slope								
坡位 Slope position	样本数 Samples	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	K-S 检验 Kolmogorov-Smirnov test	分布类型 Distribution type
坡上 Upper slope	16	27.86	98.92	65.71a	21.74	0.33	0.938	正态分布
坡中 Middle slope	16	24.59	96.77	58.39a	24.20	0.41	0.446	正态分布
坡下 Lower slope	16	23.44	129.09	61.42a	33.00	0.54	0.312	正态分布

n = 48;不同小写字母表示不同坡位土壤有机碳含量差异显著 (*P* < 0.05)

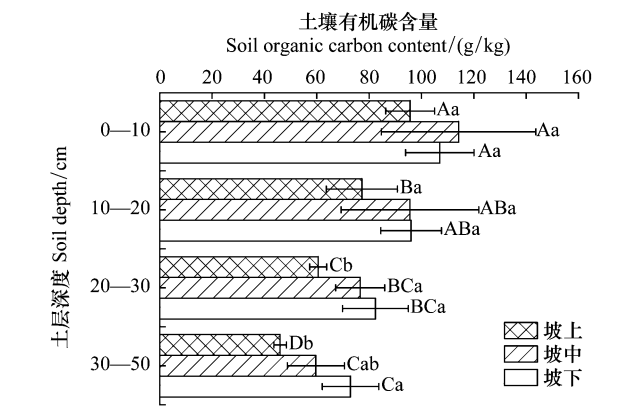


图 3 阴坡不同坡位土壤有机碳分布特征

Fig. 3 Characteristics of soil organic carbon distribution in different slope positions on shady slope

不同大写字母表示同一坡位不同深度土壤有机碳含量差异显著 (*P* < 0.05),不同小写字母表示同一深度不同坡位土壤有机碳含量差异显著 (*P* < 0.05)

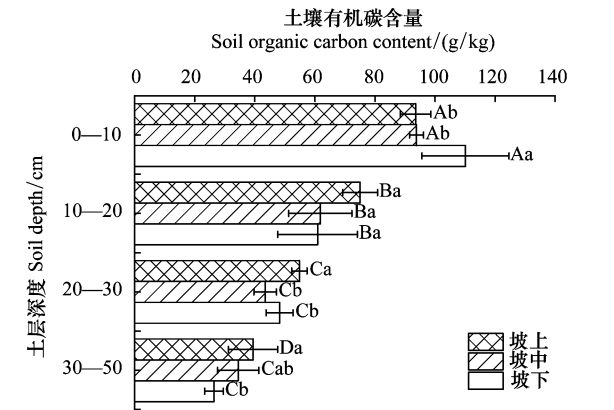


图 4 阳坡不同坡位土壤有机碳分布

Fig. 4 Characteristics of soil organic carbon distribution in different slope positions on sunny slope

不同大写字母表示同一坡位不同深度土壤有机碳含量差异显著 (*P* < 0.05),不同小写字母表示同一深度不同坡位土壤有机碳含量差异显著 (*P* < 0.05)

2.4 坡面土壤有机碳分布的影响因素

用一般线性模型的方差成分分析计算了各因子及其交互作用对土壤有机碳变异性的贡献(表 6)。结果表明,坡面土壤有机碳含量主要受土层和坡向的影响(*P* < 0.001),解释率分别是 60.35%和 14.17%;坡位对坡面土壤有机碳的解释率为 1.41% (*P* < 0.05),坡向×坡位解释了 4.46% (*P* < 0.001),坡向×土层解释了 2.21% (*P* < 0.05),坡位×土层仅解释了 0.46% (*P* > 0.05),最后坡向×坡位×土层解释了 2.28% (*P* > 0.05)。

3 讨论

3.1 坡向与土壤有机碳分布

本文研究结果表明,阴坡平均有机碳含量(81.99 g/kg)显著高于阳坡(61.84 g/kg),不同深度土壤有机碳含量也均表现为阴坡大于阳坡且差异性显著 (*P* < 0.05)。这与朱猛等^[21]在祁连山森林草原带坡面土壤有机碳分布的研究结果较为一致,他的研究表明土壤有机碳浓度为北坡>西坡>西南坡>南坡。这是因为不同坡向

所驱动的水热条件和植被差异是影响坡面土壤有机碳积累的主要因素^[10,41]。据实际观测结果表明,本研究区阴、阳坡年均温的差异达 2.8℃,阴坡 0—50 cm 土壤平均含水量是阳坡的 1.46 倍。这种水热差异导致阴阳坡发育不同的植被类型,其中阳坡植被类型为高寒草甸,阴坡植被类型为高寒灌丛。据实地调查,在生长季旺期,阴坡地上生物量(390.5 g/m²)远大于阳坡(152.22 g/m²),其有机质的输入量也大于阳坡,因此植被类型在很大程度上影响了土壤有机碳的富集程度^[42]。于顺龙^[43]的研究也表明,坡向通过影响生物量的大小来影响有机质的输入量。虽然本研究未对地下生物量进行测定,但大量野外调查结果显示高寒灌丛的地下生物量大于高寒草甸。如陶贞等^[44]发现青藏高原东北隅祁连山东段的高寒灌丛的地下生物量为 27947 kg/hm²,高寒草甸地下生物量为 25745 kg/hm²。此外,不同坡向水热条件的差异还会影响土壤有机碳的矿化^[45]。马文瑛^[46]等在祁连山天老池小流域不同地形条件土壤有机碳的研究中发现,阴坡和半阴坡的土壤有机碳矿化速率小于阳坡。这主要是因为阴坡湿冷的水热状况降低了微生物活性和土壤呼吸速率^[47],减缓了土壤有机碳的矿化,长期作用下导致了阴阳坡有机碳积累的差异。

表 6 不同因子与土壤有机碳含量的一般线性模型 (GLM) 结果
Table 6 General linear model (GLM) results of different factors and soil organic carbon content

成分 Components	平方和 Quadratic sum	df	方差 Variance	解释率/% Probability
坡向 Slope aspect	9746.958	1	69.529 ***	14.17
坡位 Slope position	967.787	2	3.452 *	1.41
土层 Soil depth	41525.774	3	98.740 ***	60.35
坡向×土层 Slope aspect × soil depth	1518.073	3	3.610 *	2.21
坡位×土层 Slope position × soil depth	318.086	6	0.378	0.46
坡向×坡位 Slope aspect × slope position	3071.051	2	10.953 ***	4.46
坡向×坡位×土层 Slope aspect × slope position × soil depth	1565.925	6	1.862	2.28

*** 为 $P<0.001$; * 为 $P<0.01$; * 为 $P<0.05$

阴坡和阳坡剖面土壤有机碳含量存在显著的表层聚集性,均表现为随着土层深度的增加,土壤有机碳含量逐渐降低,且差异显著($P<0.05$)。这是因为,表层土壤有机碳主要来自于植物残体和根系的直接输入,随着土壤深度增加,地表植物残体输入和根系分布均减少^[48]。但阴坡和阳坡土壤有机碳随土层下降的幅度不同,阳坡降低幅度(64%)大于阴坡(44%)。这与杨帆^[32]等在祁连山中段高寒山区阴、阳坡地形序列下有机碳垂直分布的研究结果较一致,他的研究结果显示阳坡下降的速率(66%—91%)明显高于阴坡(31%—77%)。这可能与阴阳坡的植被类型及土壤发生层厚度有关^[49]。本研究区阳坡的高寒草甸下发育的土壤类型为高山草甸土,土层薄,一般为 30—50 cm。最上层为草毡层(0—10 cm),腐殖质层厚 10—20 cm,向下迅速过渡到母质层;除草毡层外,剖面砾石含量较高,地下根生物量主要分布在 0—20 cm^[50-51]。因此整个剖面有机碳含量高度变异,变异系数 CV 高达 43%。阴坡的高寒灌丛下发育的土壤为亚高山草甸土,土壤剖面构型与草甸土相同,但具有大量发达的地下根系,腐殖质层较厚,深度可达到 30—40 cm,打钻至 50 cm 未见砾石层,地下根生物量主要分布在 0—50 cm 土层。何俊龄^[52]对青藏高原金露梅灌丛土壤养分的研究中指出植物根系分布较深将导致土壤养分随土壤深度呈较均匀变化。因此阴坡有机碳分布比较均匀,随土层下降的幅度小于阳坡。

3.2 坡位与土壤有机碳分布

土壤有机碳的坡位分布因坡向而异。阴坡不同坡位土壤有机碳平均含量差异显著($P<0.05$),表现为坡下(89.60 g/kg)>坡中(86.52 g/kg)>坡上(69.87 g/kg),这与汝海丽等^[8]在黄土丘陵区坡面、樊红柱等^[13]在紫色土丘陵区坡面的研究结果均一致。这一方面是因为阴坡坡上比坡下接受的光照多,蒸发量大,土壤含水

量较低,从而有利于有机质的分解,所以土壤有机碳含量小于坡下^[53];另一方面可能是由于土壤有机碳在坡面发生搬运迁移到坡下所造成的^[26]。陆银梅^[26]和花可可等^[27]对南方红壤和紫色土坡面有机碳的研究中发现,坡地径流(地表径流和壤中流)对坡面土壤有机碳的冲刷与运移,可使坡下成为坡上的一个碳汇。本研究区虽处于高寒半干旱区,但生长季期间6—9月份降水量约占全年总降水量的90%,这一段时期正好是季节性冻土的融化期。李元寿等^[54]在青藏高原典型高寒草甸区土壤有机碳氮异质性的研究中发现,在高寒地区冻土活动层的融化期,土壤有机碳和全氮很容易被淋溶流失。这是因为季节性冻融作用能够破坏土壤结构^[55],暴露出有机碳库中各种形态的碳^[56-57];再加上冻结期冻土的保水性^[58-59],在季节性冻土融化时,土壤含水量急剧增加,坡地径流发育^[60],从而造成土壤有机碳随水分的迁移而流失。由Hu等^[33]对该研究区坡地径流的实际观测结果可知,2018年7—10月份阴坡的总径流量(5.30 mm)是阳坡(0.57 mm)的9.30倍,因此阴坡土壤有机碳更易受坡地径流的影响在坡下发生积累汇聚。这可能也是导致阳坡坡位土壤有机碳分布特征和阴坡不同的原因^[26],研究结果表明,阳坡不同坡位土壤有机碳平均含量表现为坡上(65.71 g/kg)>坡下(61.42 g/kg)>坡中(58.39 g/kg),差异不显著($P>0.05$)。这与朱猛等^[21]在祁连山森林草原带的研究结果较为一致,其研究发现在北坡(阳坡),坡肩及坡脚有机碳浓度无显著差异,坡肩某些深度有机碳浓度稍高于坡脚。这可能是因为阳坡不同坡位接受的太阳辐射接近^[21],水分是其植物生长及有机碳分解的限制因子。由实测数据可知,本研究区阳坡土壤含水量为坡下(39.50%)<坡中(42.03%)<坡上(54.85%),因此阳坡坡上土壤有机碳含量积累量高于坡下和坡中($P<0.05$)。

此外本研究发现,坡位对不同深度土壤有机碳的影响也因坡向而异。对于阳坡,虽然不同坡位土壤有机碳平均含量表现为坡上>坡下>坡中($P>0.05$),但表层(0—10 cm)土壤有机碳表现为坡上<坡下<坡中($P<0.05$);对于阴坡,浅层(0—10、10—20 cm)土壤有机碳各坡位间差异性不显著($P>0.05$),而深层(20—30、30—50 cm)土壤有机碳各坡位间差异显著($P<0.05$)。上述结果表明,阳坡坡位对浅层土壤有机碳的影响大于深层,而阴坡坡位对深层土壤有机碳的影响大于浅层。这可能与阴坡和阳坡不同的径流形式(地表径流和壤中流)对土壤有机碳的冲刷有关^[27,61]。李太魁等^[61]对川西丘陵区紫色土坡面有机碳的研究中发现,紫色土由于土质疏松、孔隙度大、入渗能力强等特点,壤中流比较发育,从而导致坡面土壤有机碳随壤中流大量淋失。Hu等^[33]对该研究区坡地径流的实际观测结果可知,阴坡壤中流量占总径流量的94.5%,阳坡地表径流量占总径流量的97.9%。因此,阴坡的深层土壤有机碳易在壤中流的影响下从坡上迁移到坡下,阳坡的表层土壤有机碳易在地表径流的影响下从坡上迁移到坡下。这种坡地径流的差异与阴阳坡的植被类型和土壤结构有关^[61-63]。阴坡植被以高寒灌丛为主,植被覆盖度高,冠层截留降雨能力较强,可以有效地减缓地表径流^[64];再加上草皮层较薄且松软,土壤饱和导水率高,土层深厚,有利于雨水向土壤更深层次入渗^[65],所以阴坡坡地径流以壤中流为主。而阳坡植被以高寒草甸为主,根系密集,形成的草毡层结构比较坚硬,饱和导水率较低,不利于水分向土壤深层下渗^[33],因此阳坡坡地径流以地表径流为主。此外,坡面的坡度不同,形成的坡地径流也存在差别^[66-67]。研究发现,土壤的入渗率随着坡度的增大而减小,从而增大地表产流量^[66]。何淑勤等^[67]通过对长江上游紫色土丘陵区坡面径流特征的研究发现,不同坡度,壤中流径流量表现为 $10^{\circ}>15^{\circ}>20^{\circ}$,地表径流径流量表现为 $20^{\circ}>15^{\circ}>10^{\circ}$ 。据实地测量,本研究阴坡坡度(30°)小于阳坡(35°),所以阴坡的土壤入渗率大于阳坡,这在一定程度上也决定了阴坡以壤中流为主、阳坡以地表径流为主的产流模式。从而导致阴坡的深层土壤有机碳和阳坡的浅层土壤有机碳分别随着壤中流和地表径流在坡面上发生迁移淋失。

3.3 不确定性分析

本研究基于不同坡面土壤有机碳测量数据进行比较分析,发现坡向对坡面土壤有机碳的解释率为14.17%($P<0.05$),而坡位对坡面土壤有机碳的解释率仅为1.41%($P<0.05$),这可能与坡面海拔落差较小导致的各坡位距离较短有关。有研究结果表明^[25,68-69],海拔落差越大,坡面越长,各个坡位的水热条件差异就越显著,从而增大土壤有机碳的空间异质性。李龙等^[68]在赤峰市小流域地形因子对土壤有机碳的影响中发现,在较大海拔落差下,高程是影响土壤有机碳分布的第一因子,其次是坡度和坡向。本研究区阴坡和阳坡立地条

件存在巨大差异,但海拔落差较小,因此坡向是影响土壤有机碳分布的第一因子,而高程对土壤有机碳影响不显著。未来需进一步深入研究较大海拔差异下高寒区阴坡和阳坡土壤有机碳的空间分布规律。此外,本研究综合了 2018 年生长季期间 7—10 月份的土壤有机碳数据,由于 4 个月份之间土壤有机碳差异不显著,因此未考虑土壤有机碳的季节变化。有研究表明季节对土壤有机碳含量的变化也有较大的影响^[70-72]。如苗蕾等^[70]研究发现太行山南麓土壤有机碳含量呈显著的季节变化,表现为夏秋季>冬春季。康成芳等^[71]研究发现川西高寒山地灌丛草甸有机碳矿化的季节动态中表现出夏季最高,春季次之,秋季最小。本研究区处于季节性冻土区,非生长季长达 200 多天,全年有超过一半时间土壤处于冻结和积雪覆盖状态。在冻结期,土壤微生物活性和有机碳矿化速率等受到抑制^[73-74],土壤水热特征与生长季相比存在巨大差异^[75];且在初冬和初春,表层土壤还会经历频繁的冻融循环^[76],这些都将直接或间接地影响土壤有机碳含量的变化。而目前关于坡面土壤有机碳分布特征在生长季和非生长季的比较研究还较为缺乏,未来还需我们进一步深入研究。

4 结论

本文以青海湖流域季节性冻土区阴、阳坡土壤为研究对象,在坡面尺度下分析了不同坡向、坡位土壤有机碳的空间分布特征及其影响因素,初步获得以下结论:

- (1) 该研究区平均土壤有机碳含量为 71.92 g/kg,总体水平较高。其中 0—10、10—20、20—30 cm 土层有机碳含量为中等变异,30—50 cm 土壤有机碳含量为高度变异;
- (2) 阴、阳坡有机碳含量均随土壤深度增加而下降,但阳坡下降的幅度(64%)明显高于阴坡(44%);
- (3) 不同坡向,土壤有机碳平均含量表现为阴坡(81.99 g/kg)>阳坡(61.84 g/kg);不同坡位,土壤有机碳含量分布因坡向而异。其中阴坡土壤有机碳平均含量表现为坡下(89.60 g/kg)>坡中(86.52 g/kg)>坡上(69.87 g/kg),阳坡土壤有机碳平均含量表现为坡上(65.71 g/kg)>坡下(61.42 g/kg)>坡中(58.39 g/kg);
- (4) 坡位对不同深度土壤有机碳的影响程度存在差异。阴坡坡位对深层土壤有机碳影响显著,而阳坡坡位对浅层土壤有机碳影响显著;
- (5) 一般线性模型结果表明,坡面土壤有机碳含量主要受土层和坡向的影响,可解释 74.52% 的变异性($P<0.001$)。因此,坡向是影响该区域土壤有机碳垂直分布的重要因素。

参考文献(References):

- [1] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [3] 潘根兴,曹建华,周运超. 土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 325-334.
- [4] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, Field D J, Henakaarchchi N, Jenkins M, Minasny B, McBratney A B, de Remy de Courcelles V, Singh K, Wheeler I, Abbott L, Angers D A, Baldock J, Bird M, Brookes P C, Chenu C, Jastrow J D, Lal R, Lehmann J, O'Donnell A G, Parton W J, Whitehead D, Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 80-99.
- [5] 李甜甜,季宏兵,孙媛媛,罗建美,江用彬,王丽新. 我国土壤有机碳储量及影响因素研究进展. *首都师范大学学报:自然科学版*, 2007, 28(1): 93-97.
- [6] Bangroo S A, Najar G R, Rasool A. Effect of altitude and aspect on soil organic carbon and nitrogen stocks in the Himalayan Mawer Forest Range. *Catena*, 2017, 158: 63-68.
- [7] 蒋腊梅,杨晓东,杨建军,何学敏,吕光辉. 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. *草业学报*, 2018, 27(12): 22-33.
- [8] 汝海丽,张海东,焦峰,郭美丽,薛超玉. 黄土丘陵区微地形梯度下草地群落植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. *自然资源学报*, 2016, 31(10): 1752-1763.
- [9] 曹伟,盛煜,吴吉春,李静,王生廷. 青藏高原坡面冻土土壤水分空间变异特性. *水科学进展*, 2017, 28(1): 32-40.
- [10] Zhu M, Feng Q, Qin Y Y, Cao J J, Zhang M X, Liu W, Deo R C, Zhang C Q, Li R L, Li B F. The role of topography in shaping the spatial patterns of soil organic carbon. *Catena*, 2019, 176: 296-305.

- [11] Yimer F, Ledin S, Abdelkadir A. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia. *Geoderma*, 2006, 135: 335-344.
- [12] 南雅芳, 郭胜利, 张彦军, 李俊超, 周小刚, 李泽, 张芳, 邹俊亮. 坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、氮变化的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 595-601.
- [13] 樊红柱, 张泽洪, 郭松, 蒋松. 紫色土丘陵区坡面土壤有机碳含量及储量分布特征. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 197-201.
- [14] 何燕, 李廷轩, 王永东. 低山丘陵区不同坡位茶园土壤有机碳特征研究. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 122-126.
- [15] 高雪松, 何鹏, 邓良基, 张世熔, 黄春. 丘陵区坡面土壤有机碳及颗粒有机碳分布特征. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 337-342.
- [16] 孟国欣, 查同刚, 张晓霞, 张志强, 朱聿申, 周娅, 刘怡函, 林珠. 植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2447-2454.
- [17] 王霖娇, 盛茂银, 杜家颖, 温培才. 西南喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳分布特征及其影响因素. *生态学报*, 2017, 37(4): 1358-1365.
- [18] 张珍明, 周运超, 田潇, 黄先飞. 喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法. *生态学报*, 2017, 37(22): 7647-7659.
- [19] 姜义亮. 黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [20] 王合领. 祁连山东缘高寒草甸区土地利用对土壤有机碳的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [21] 朱猛, 刘蔚, 秦燕燕, 曹建军, 李会亚, 赵玉. 祁连山森林草原带坡面尺度土壤有机碳分布. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 741-748.
- [22] 杨鹏. 祁连山东段高寒草地土壤理化性质空间变化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [23] 李玉琴. 川西山小流域土壤有机碳空间分布特征研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [24] Tsui C C, Chen Z S, Hsieh C F. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 131-142.
- [25] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征. *生态学报*, 2007, 27(2): 603-612.
- [26] 陆银梅. 红壤坡地水力侵蚀下土壤有机碳迁移分布规律及流失过程模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [27] 花可可, 朱波, 王小国. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 81-88.
- [28] 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. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 693-700.
- [29] 马素辉, 牟翠翠, 郭红, 张现凯, 栗泽苑, 张廷军. 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. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 426-433.
- [30] 李娜, 王根绪, 高永恒, 王俊峰, 柳林安. 模拟增温对长江源区高寒草甸土壤养分状况和生物学特性的影响研究. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1214-1224.
- [31] 牟翠翠, 张廷军, 曹斌, 万旭东, 彭小清, 程国栋. 祁连山区黑河上游俄博岭多年冻土区活动层碳储量研究. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 1-9.
- [32] 杨帆, 黄来明, 李德成, 杨飞, 杨仁敏, 赵玉国, 杨金玲, 刘峰, 张甘霖. 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. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1226-1236.
- [33] Hu G R, Li X Y, Yang X F. The impact of micro-topography on the interplay of critical zone architecture and hydrological processes at the hillslope scale: integrated geophysical and hydrological experiments on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124618.
- [34] 孙辉, 秦纪洪, 吴杨. 土壤冻融交替生态效应研究进展. *土壤*, 2008, 40(4): 505-509.
- [35] Chen L F, He Z B, Du J, Yang J J, Zhu X. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China. *Catena*, 2016, 137: 37-43.
- [36] 程国栋, 赵林. 青藏高原开发中的冻土问题. *第四纪研究*, 2000, 20(6): 521-531.
- [37] Wu Q B, Lu A J, Liu Y Z. Permafrost Changes in the Tibetan Plateau. *Advance in Climate Change Research*, 2006, 2(S1): 77-80.
- [38] 南卓铜, 李述训, 程国栋. 未来 50 与 100a 青藏高原多年冻土变化情景预测. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2004, 34(6): 528-534.
- [39] 李成秀, 李小雁, 杨太保, 李岳坦. 青海湖流域沙柳河草甸群落结构与数量特征. *干旱区研究*, 2013, 30(6): 1028-1035.
- [40] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys//Nielsen D R, Bouman J, eds. *Soil Spatial Variability*. Wageningen: Pudoc, 1985: 166-194.
- [41] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远, 肖桐. 三江源典型高寒草地坡面土壤有机碳变化特征及其影响因素. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2072-2087.
- [42] 芦宝良. 青海湖流域景观格局变化及其对土壤有机碳库的影响[D]. 西宁: 青海师范大学, 2013.
- [43] 于顺龙. 坡向、坡位对水曲柳中龄林生长与生物量分配的影响. *内蒙古林业调查设计*, 2009, 32(1): 54-56.
- [44] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 孙彦敏, 易惟熙, 李英年. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征. *地理学报*, 2006, 61(7): 720-728.
- [45] 常宗强, 史作民, 冯起, 苏永红. 黑河流域山区牧坡草地土壤呼吸的时间变化及水热因子影响. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1603-1606.
- [46] 马文瑛, 赵传燕, 王超, 王阳. 祁连山天老池小流域土壤有机碳空间异质性及其影响因素. *土壤*, 2014, 46(3): 426-432.
- [47] Wang J W, Cai W Q. Studies on genesis, types and characteristics of the soils of the Xilin river basin//Inner Mongolia Grassland Ecosystem

- Research Station, the Chinese Academy of Sciences, ed. Research on Grassland Ecosystem (no. 3). Beijing: Science Press, 1988: 23-83.
- [48] 李龙, 周飞, 田杰, 王晓军. 地形因子对半干旱地区土壤有机碳含量的影响. 北方园艺, 2019, (16): 104-109.
- [49] 李世杰, 孟伟. 贵州省栎类土壤发生层特征及对土壤有机碳密度的影响. 林业资源管理, 2016, (3): 112-115, 134-134.
- [50] 林丽, 曹广民, 李以康, 张法伟, 郭小伟, 韩道瑞. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草草甸碳过程的影响. 生态学报, 2010, 30(15): 4012-4018.
- [51] 曹生奎, 陈克龙, 曹广超, 朱锦福, 芦宝良, 张涛, 王记明. 青海湖流域矮嵩草草甸土壤有机碳密度分布特征. 生态学报, 2014, 34(2): 482-490.
- [52] 何俊龄. 金露梅对青藏高原高寒草甸植被特征和土壤性质的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [53] 朱猛, 冯起, 张梦旭, 秦燕燕. 祁连山中段草地土壤有机碳分布特征及其影响因素. 草地学报, 2018, 26(6): 1322-1329.
- [54] 李元寿, 张人禾, 王根绪, 赵林, 丁永建, 王一博. 青藏高原典型高寒草甸区土壤有机碳氮的变异特性. 环境科学, 2009, 30(6): 1826-1831.
- [55] 韩露, 万忠梅, 孙赫阳. 冻融作用对土壤物理、化学和生物学性质影响的研究进展. 土壤通报, 2018, 49(3): 736-742.
- [56] 杨红露, 秦纪洪, 孙辉. 冻融交替对土壤 CO₂ 及 N₂O 释放效应的研究进展. 土壤, 2010, 42(4): 519-525.
- [57] 王洋, 刘景双, 王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1269-1274.
- [58] 杨梅学, 姚檀栋, 何元庆. 青藏高原土壤水分分布特征及冻融过程在季节转换中的作用. 山地学报, 2002, 20(5): 553-558.
- [59] Nixon J F. The frozen earth: fundamentals of geocryology. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(4): 530-530.
- [60] 肖雄, 李小雁, 吴华武, 蒋志云, 李宗超. 青海湖流域高寒草甸壤中水分来源研究. 水土保持学报, 2016, 30(2): 230-236.
- [61] 李太魁, 杨小林, 花可可, 寇长林. 紫色土坡耕地可溶性有机碳淋失特征. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1836-1842.
- [62] 聂小东. 水力侵蚀对红壤丘陵区土壤有机碳迁移分布及稳定机制的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [63] 沈奕彤, 郭成久, 金珊, 董爽. 土壤容重对黑土坡面养分流失的影响. 水土保持学报, 2016, 30(1): 26-30.
- [64] 李香云. 缙云山林地坡面径流特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [65] 吕锡芝, 康玲玲, 左仲国, 孙娟, 倪用鑫. 黄土高原吕二沟流域不同植被下的坡面径流特征. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1113-1117.
- [66] 陈晓安, 杨洁, 汤崇军, 郑太辉, 李龙飞. 雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响. 农业工程学报, 2017, 33(9): 141-146.
- [67] 何淑勤, 宫渊波, 武万华, 郑子成. 不同坡度下玉米生长期紫色土坡面径流及其可溶性有机碳流失特征. 水土保持学报, 2019, 33(1): 91-97.
- [68] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 郭月峰, 平春. 赤峰市小流域地形因子对土壤有机碳密度的影响. 中国水土保持, 2014, (3): 43-46.
- [69] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 龚兰兰. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局. 生态学报, 2020, 40(2): 629-639.
- [70] 苗蕾, 杨喜田, 王婷, 孙玉军, 张军. 太行山南麓不同演替阶段土壤有机碳含量及季节变化特征. 河南农业大学学报, 2016, 50(3): 318-324.
- [71] 康成芳, 宫渊波, 车明轩, 许蔓菁, 吕宸, 刘韩. 川西高寒山地灌丛草甸不同海拔土壤有机碳矿化的季节动态. 生态学报, 2020, 40(4): 1367-1375.
- [72] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 郭跃东. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态. 环境科学, 2011, 32(1): 290-297.
- [73] 王娇月, 韩耀鹏, 宋长春, 郝凤明. 冻融作用对大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤有机碳矿化的影响研究. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 59-66.
- [74] Watanabe T, Tateno R, Imada S, Fukuzawa K, Isobe K, Urakawa R, Oda T, Hosokawa N, Sasai T, Inagaki Y, Hishi T, Toda H, Shibata H. The effect of a freeze - thaw cycle on dissolved nitrogen dynamics and its relation to dissolved organic matter and soil microbial biomass in the soil of a northern hardwood forest. Biogeochemistry, 2019, 142(3): 319-338.
- [75] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 徐振锋, 刘金铃, 李志萍, 黄莉. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤 DOC 淋洗的影响. 水土保持学报, 2013, 27(6): 205-210.
- [76] 陈哲. 季节性冻土区生态系统土壤温室气体排放研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.