

祁连山中段典型植被土壤有机碳密度研究

马 剑^{1, 2, 3}, 金 铭^{1, 2, 3}, 敬文茂^{1, 2, 3}, 王顺利^{1, 2, 3}, 赵维俊^{1, 2, 3}, 王荣新^{1, 2, 3},
任小凤^{1, 2, 3}, 赵晶忠^{1, 2, 3}, 呼海林⁴

(1. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000; 2. 甘肃省森林生态与冻土水文水资源重点实验室,
甘肃 张掖 734000; 3. 甘肃省祁连山森林生态系统野外科学观测研究站, 甘肃 张掖 734000;
4. 祁连山自然保护区西水自然保护区, 甘肃 张掖 734000)

摘 要: 【目的】探讨祁连山不同植被类型土壤有机碳含量及密度的分布规律, 为祁连山区土壤碳库的科学管理及精确估算提供科学依据。【方法】选择分布在祁连山排露流域的青海云杉林、灌木林、草地等3种典型植被为研究对象, 通过野外调查取样和室内测定分析, 研究了3种植被类型土壤有机碳含量及密度的分布特征。【结果】3种植被类型0~60 cm土层平均有机碳含量为31.74~65.19 g·kg⁻¹, 青海云杉林土壤有机碳含量显著高于灌木林和草地 ($P < 0.05$), 但灌木林与草地之间差异不显著 ($P > 0.05$); 0~60 cm土层平均有机碳密度为12.61~18.65 kg·m⁻², 青海云杉林与灌木林之间差异不显著 ($P > 0.05$), 但与草地差异显著 ($P < 0.05$); 灌木林土壤有机碳含量及密度变异程度较为剧烈。随着土层深度的增加, 青海云杉林土壤有机碳含量呈先增大后减小趋势, 10~20 cm土层有机碳含量显著高于其它土层, 而其它土层含量较为接近; 灌木林和草地土壤有机碳含量呈减小趋势, 具有明显的“表聚现象”。随着土层深度的增加, 青海云杉林土壤有机碳密度也呈先增大后减小趋势, 10~20 cm土层有机碳密度显著高于其它土层, 表层有机碳密度明显低于其它土层; 灌木林和草地土壤有机碳密度呈减小趋势。0~40 cm土层有机碳密度占整个剖面的66.99%~77.56%, 40 cm以下土壤有机碳密度较小。【结论】祁连山区青海云杉林更有利于土壤有机碳的储存和积累, 3种植被类型大部分土壤有机碳存储在0~40 cm土层。

关键词: 土壤有机碳密度; 土壤有机碳含量; 典型植被; 祁连山

中图分类号: S718.51⁺6; S158.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2020)08-0099-07

Study on soil organic carbon density of typical vegetation in middle Qilian mountains

MA Jian^{1,2,3}, JIN Ming^{1,2,3}, JING Wenmao^{1,2,3}, WANG Shunli^{1,2,3}, ZHAO Weijun^{1,2,3}, WANG Rongxin^{1,2,3}, REN Xiaofeng^{1,2,3},
ZHAO Jingzhong^{1,2,3}, HU Hailin⁴

(1. Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye 734000, Gansu, China;
2. Key Laboratory of Hydrology & Water Resources of Forest Ecology & Frozen Soil of Gansu Province, Zhangye 734000,
Gansu, China; 3. Gansu Qilian Mountain Forest Ecosystem Observation & Research Station, Zhangye 734000, Gansu, China;
4. Xishui Nature Conservation Station of Qilian Mountain Nature Reserve, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: 【Objective】In order to provide scientific basis for scientific management and accurate estimation of soil carbon pool in Qilian mountains, the distribution law of soil organic carbon content and density in different vegetation types of Qilian mountains was explored. 【Method】We selected *Picea crassifolia* forest, shrubs and grassland which lived in Pailugou catchment of Qilian mountains as objects. By field investigation and laboratory analysis, the distribution characteristics of soil organic carbon content and density of different vegetation types were studied. 【Result】the soil organic carbon content of 0-60 cm soil layer of three vegetation types was 31.74-65.19 g·kg⁻¹, the soil organic carbon content of *Picea crassifolia* forest were higher than that of shrubs and grassland, and there was significant difference between *Picea crassifolia* forest and shrubs, grassland ($P < 0.05$), but no significant difference between shrubs and grassland ($P > 0.05$). the average soil organic carbon density was 12.61-18.65 kg·m⁻². The soil organic carbon density of *Picea*

收稿日期: 2019-07-05

基金项目: 甘肃省自然科学基金重大项目(18JR4RA002); 甘肃省林业科技计划项目(2018kj014, 2018kj016); 科技基础性工作专项(2014FY120700); 甘肃祁连山森林生态监测与评估国际科技合作基地建设项目。

第一作者: 马剑, 高级工程师, 博士研究生。通信作者: 金铭, 研究员, 博士。E-mail: shyjinming@163.com

引文格式: 马剑, 金铭, 敬文茂, 等. 祁连山中段典型植被土壤有机碳密度研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(8): 99-105.

MA J, JIN M, JING W M, et al. Study on soil organic carbon density of typical vegetation in middle Qilian mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(8): 99-105.

crassifolia forest was higher than that of shrubs and grassland, but there was no significant difference between *Picea crassifolia* forest and shrubs ($P > 0.05$), and significant difference between *Picea crassifolia* forest and grassland ($P < 0.05$). the variation degree of soil organic carbon content and density in shrubs was more intense. With the increase of soil depth, soil organic carbon content of *Picea crassifolia* forest increased at first and then decreased. the soil organic carbon content in 10-20 cm soil layer was significantly higher than that in other soil layers, while the content in other soil layers was relatively close; The soil organic carbon content of shrubs and grassland decreased gradually with the deepening of soil layer, and had obvious surface accumulation phenomenon. With the increase of soil depth, soil organic carbon density of *Picea crassifolia* forest increased at first and then decreased. The soil organic carbon density in 10-20 cm soil layer was significantly higher than that in other soil layers, and the organic carbon density in surface layer was significantly lower than that in other soil layers; the soil organic carbon density of shrubs and grassland decreased gradually with the deepening of soil layer. The organic carbon density of 0-40 cm soil layer accounted for 66.99%-77.56% of the whole profile, and the soil organic carbon density below 40 cm was small. 【Conclusion】 *Picea crassifolia* forest was more beneficial to the storage and accumulation of soil organic carbon. Most of the soil organic carbon was stored in 0-40 cm soil layer in the three vegetation types.

Keywords: soil organic carbon density; soil organic carbon content; typical vegetation types; Qilian mountains

土壤是陆地生态系统最大的有机碳库, 其有机碳储量大约是大气碳库的 2 倍, 植物碳库的 3 倍^[1], 土壤碳库的微小变化即能引起大气中 CO_2 浓度巨大的变化, 因此在陆地生态系统碳循环中有着极为重要的作用^[2-3]。森林生态系统是陆地生物圈的主体, 维持着约 73% 的土壤碳库^[4], 森林土壤作为森林生态系统的重要组成部分, 在全球碳循环中起着源、汇、库的作用^[5], 其有机碳储量的变化影响着陆地生态系统碳收支平衡, 是引起大气碳库和全球气候变化的主要因素^[6]。因此, 开展森林土壤有机碳密度变化研究的意义重大。植被类型差异导致凋落物量和根系生物量不同, 使土壤表层及内部形成不同的微气候, 通过作用于土壤微生物影响土壤有机碳输入和输出过程^[7], 导致不同植被类型间土壤碳储量和密度差异显著^[8]; 土壤理化特性在局部范围内影响土壤有机碳的含量^[9], 土层深度不同, 土壤容重、土壤 pH 值以及土壤温度、湿度等特性存在差异, 导致土壤有机碳含量也不同^[10]。因此植被类型与土层深度对土壤有机碳储量的影响不容忽视, 研究不同植被条件和不同土层条件下的森林土壤有机碳是预测和分析全球碳循环的重要组成部分^[11-12]。

已有学者对祁连山区森林土壤有机碳含量、密度及其分布特征进行了研究^[13-16], 但研究多围绕单一植被类型进行, 对不同植被类型下土壤有机碳储量及密度的研究较少, 这在一定程度上影响了祁连山区森林土壤有机碳密度的精确估算。祁连山排露沟流域植被呈板块格局分布, 即青海云杉林分布于阴坡、半阴坡, 灌丛分布于阴坡、半阴坡, 紧邻青海云杉林, 而草地仅分布于阳坡, 3 种植被类型是祁连山森林生态系统的重要组成部分^[17]。研究这 3 种典型植被类型的土壤有机碳密度, 不仅有助于深入了解祁连山区森林土壤碳储量,

而且对准确估算该地区森林土壤有机碳密度有着十分重要的意义。为此, 本研究选择祁连山排露沟流域的 3 种典型植被为研究对象, 采用野外调查取样和室内分析结合的方法, 研究了不同植被类型土壤有机碳含量及密度的分布规律, 以期祁连山区土壤碳库的科学管理及精确估算提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山中段的排露沟流域, 地理位置 $100^{\circ}17' \sim 100^{\circ}18'E$, $38^{\circ}32' \sim 38^{\circ}33'N$, 流域总面积 2.85 km^2 , 海拔 $2\ 600 \sim 3\ 800 \text{ m}$, 年平均气温 $-0.6 \sim 2.0^{\circ}\text{C}$, 年平均相对湿度为 60%, 属高寒半干旱山地森林草原气候^[18-19]。流域内土壤类型主要有山地栗钙土、山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土、高山寒漠土。建群树种青海云杉分布在海拔 $2\ 600 \sim 3\ 300 \text{ m}$ 的阴坡、半阴坡, 与阳坡草地犬齿交错分布; 灌木优势种有金露梅 *Potentilla fruticosa*、鬼箭锦鸡儿 *Caragana jubata* 和吉拉柳 *Salix gilashanica* 等, 草本主要有珠芽蓼 *Polygonum viviparum*、黑穗苔 *Carex atrata* 和针茅 *Stipa* 等^[20]。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤采集及测定

依据研究区植被分布状况, 选取研究区内具有代表性的青海云杉林、灌木林和草地等 3 种典型植被为研究对象。采用典型样地法, 在每个类型内选择海拔、坡度、坡向等立地条件相似的坡面建立 3 个大小为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的调查样地, 然后在每个样地内采用栅格法把整个样地划分为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的小样格, 对样格内植被的高度、盖度、冠

幅等内容进行调查,样地基本情况见表 1。2015 年生季 5—9 月,在每个样地内沿对角线方向挖 3 个土壤剖面,首先对土壤湿度、土壤颜色、土壤质地、土壤结构、砾石含量等情况进行调查记录,然后用 200 cm³ 的环刀分别采集 0~10、10~20、20~40 和 40~60 cm 的土壤样品,装入密封袋内,用于测定土壤容重。同时在每个

采样点分别采集 0~10、10~20、20~40 和 40~60 cm 土层的土样,每一层次取 3 个重复,将每个层次的土样放在塑料布上,将残根、石块等摘干净,混匀得到混合土样。所采集的土样,用塑料袋密封带回实验室,经自然风干后,磨细,取部分土样过 2 mm 土壤筛,用于测定土壤有机碳含量^[21]。

表 1 样地基本情况
Table 1 The general characteristics of sample plots

植被类型 Vegetation type	优势种 Dominant species	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	坡向 Slope aspect /(°)	坡度 Slope gradient /(°)	郁闭度 Canopy density /%	盖度 Coverage /%	土壤类型 Soil type
青海云杉林 <i>Picea Crassifolia</i>	青海云杉	100°30'13.89"	38°54'33.33"	33	12	30	/	亚高山 草甸土
灌木林 Shrubland	金露梅	100°29'08.33"	38°56'75.00"	339	8	/	34	灰褐土
草地 Grassland	珠芽蓼、苔草、针茅、 蒿、棘豆、马蔺等	100°30'21.94"	38°54'55.83"	320	30	/	43	栗钙土

1.2.2 土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度代表单位面积土壤有机碳的质量,某一土层有机碳密度用以下公式^[22]计算:

$$SOC_i = C_i \times D_i \times B_i \times (1 - G_i) / 100。$$
 (1)

式(1)中: SOC_i 是第 i 层土壤有机碳密度 (kg·m⁻²), C_i、D_i、B_i、G_i 分别为第 i 层土壤有机碳含量 (g·kg⁻¹)、土层厚度 (cm)、土壤容重 (g·cm⁻³) 及粒径大于 2 mm 砾石的体积百分含量 (%)。

如果土壤剖面由 n 个土层组成,则该土壤剖面的有机碳密度采用以下公式计算:

$$SOC_i = \sum_{i=1}^n C_i \times D_i \times B_i \times (1 - G_i) / 100。$$
 (2)

采用以下公式计算每层土壤单位面积有机碳储量占总有机碳储量的百分比:

$$R_i = \frac{SOC_i}{\sum_{i=1}^n SOC_i}。$$
 (3)

为了便于比较分析各层土壤有机碳密度,各采样间隔土层厚度 D_i 均按 10 cm 计算,以便消除各土层不同采样深度的干扰。

1.2.3 数据分析

采用 Excel 2010 软件整理、计算数据,采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,运用单因素方差分析法分析不同植被和不同土层间土壤有机碳含量及密度的差异性。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量及分布特征

由表 2 可知,3 种植被类型 0~60 cm 土壤平均有机碳含量为 31.74~65.19 g·kg⁻¹,其中青海云杉林土壤平均有机碳含量最大,为 65.19 g·kg⁻¹,分别是灌木林和草地的 1.43、2.05 倍,草地土壤平均有机碳含量最小,为 31.74 g·kg⁻¹。0~60 cm 土壤有机碳含量均值由大到小表现为青海云杉林>灌木林>草地,青海云杉林与灌木林、草地之间差异显著 (P<0.05),而灌木林与草地之间差异不显著 (P>0.05)。进一步分析发现,3 种植被类型变异系数介于 6.56%~16.79% 之间,灌木林土壤平均有机碳含量的变异系数最大,为 16.79%,说明灌木林土壤平均有机碳含量的变异程度较其他 2 种植被更为剧烈。

表 2 不同植被类型土壤有机碳含量[†]
Table 2 Soil organic carbon content of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	不同土层有机碳含量 Soil organic carbon /(g·kg ⁻¹)					标准差 Standard deviation	CV /%
	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	平均 Average		
青海云杉林 <i>Picea crassifolia</i>	56.28 b	83.85 a	61.56 b	59.07 b	65.19 a	4.28	6.56
灌木林 Shrubland	63.56 a	42.75 b	39.37 b	36.46 b	45.63 b	7.66	16.79
草地 Grassland	48.49 a	31.97 b	26.53 bc	19.95 c	31.74 b	4.91	15.48

† 不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。下同。
Different small letters indicate significant difference (P<0.05). The same below.

由表 2 可知，3 种植被类型土壤有机碳剖面分布亦存在差异。青海云杉林土壤有机碳含量为 56.28 ~ 83.85 g·kg⁻¹，灌木林土壤有机碳含量为 36.46 ~ 63.56 g·kg⁻¹，草地土壤有机碳含量为 19.95 ~ 48.49 g·kg⁻¹。其中随土层的加深，青海云杉林土壤有机碳含量先增大后减小，整体上呈增大的趋势，0 ~ 10 cm 土层有机碳含量最低，为 56.28 g·kg⁻¹，10 ~ 20 cm 土层有机碳含量最高，为 83.85 g·kg⁻¹，与其它土层差异显著 ($P < 0.05$)，这可能与研究区青海云杉林土壤质地、根系分布及返还到土壤中的有机物等有关；灌木林和草地 0 ~ 10 cm 土层有机碳含量高于其他土层，其中灌木林 0 ~ 10 cm 土层有机碳含量分别是 10 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层的 1.49、1.60 和 1.74 倍，草地 0 ~ 10 cm 土层有机碳含量分别是 10 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层的 1.52、1.83 和 2.43 倍，2 种植被类型 0 ~ 10 cm 土层与其他土层差异均显著 ($P < 0.05$)，说明这 2 种植被土壤有机碳具有明显的“表聚现象”，地表凋落物对表层有机碳的积累起着重要作用。随着土层的加深，灌木林和草地土壤有机碳含量逐渐减小。

2.2 土壤有机碳密度及分布特征

土壤有机碳密度大小主要取决于土壤有机碳含量和土壤容重 2 个重要参数^[23]。在不同的植被类型中，由于根系分布、凋落物分解和人为干扰的影响，土壤有机碳含量和土壤体积质量都会发生变化，因此土壤碳密度也会发生变化^[24]。由表 3 可以看出，0 ~ 60 cm 土壤平均有机碳密度变化范围为 12.61 ~ 18.65 kg·m⁻²。3 种植被类型中，青海云杉林土壤平均有机碳密度最大，为 18.65 kg·m⁻²，草地土壤平均有机碳密度最小，为 12.61 kg·m⁻²，各植被类型土壤平均有机碳密度由大到小表现为

青海云杉林 > 灌木林 > 草地，青海云杉林与灌木林之间差异不显著 ($P > 0.05$)，但与草地差异显著 ($P < 0.05$)，青海云杉林平均土壤有机碳密度分别是灌木林和草地的 1.2 和 1.7 倍。就变异系数而言，灌木林土壤有机碳密度变异最大，为 16.82%，而青海云杉林土壤有机碳密变异最小，仅为 7.09%，说明青海云杉林下土壤有机碳密度的变异程度最小，而灌木林土壤有机碳密度的变异程度较其他 2 种植被更为剧烈。这可能与青海云杉林、灌木林林下植被根系分布、动物活动、溶解性有机碳的移动以及人为活动等许多因素的空间差异有关。

由表 3 还可看出，3 种植被类型土壤 10 cm 厚度的有机碳密度垂直分布存在差异。对青海云杉林而言，随着土层的加深，有机碳密度呈先增加后减小趋势，表层 0 ~ 10 cm 土壤平均有机碳密度最小，为 2.59 kg·m⁻²，10 ~ 20 cm 土壤平均有机碳密度最大，为 6.20 kg·m⁻²，10 ~ 60 cm 土壤平均有机碳密度显著大于表层。灌木林和草地土壤平均有机碳密度均随土层加深呈减小趋势，0 ~ 10 cm 土层土壤平均有机碳密度高于其他土层。其中灌木林 0 ~ 10 cm 土层有机碳密度分别是 10 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层的 1.27、1.26 和 1.04 倍，草地 0 ~ 10 cm 土层有机碳密度分别是 10 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 土层的 1.50、1.33 和 1.30 倍，2 种植被类型 0 ~ 10 cm 土层与 20 ~ 60 cm 土层差异显著 ($P < 0.05$)。由此可以看出土壤有机碳密度与有机碳含量变化趋势一致，也表现出了很强的表聚性，进一步分析发现，土壤有机碳密度在 20 ~ 40、40 ~ 60 cm 土层间差异不显著 ($P > 0.05$)，说明 20 cm 土层以下，由于土壤受枯落物、植物根系和人为活动的影响较小，土壤有机碳密度相对稳定。

表 3 不同植被类型土壤有机碳密度
Table 3 Soil organic carbon density of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	土壤有机碳密度 Soil organic carbon density /(kg·m ⁻²)					标准差 Standard deviation	CV /%
	0 ~ 10 /cm	10 ~ 20 /cm	20 ~ 40 /cm	40 ~ 60 /cm	合计 Total		
青海云杉林 <i>Picea crassifolia</i>	2.59 c	6.20 a	5.15 b	4.71 b	18.65 a	0.330 8	7.09
灌木林 Shrubland	5.47 a	4.32 ab	3.43 b	3.31 b	16.53 ab	0.694 8	16.82
草地 Grassland	4.95 a	3.29 b	2.47 c	1.90 c	12.61 b	0.369 7	11.74

3 种植被类型各土层土壤有机碳密度占全剖面 (0 ~ 60 cm) 土壤密度的比例见图 1。由图 1 可知，0 ~ 20 cm 土层有机碳密度所占比例大小顺序为草地 (48.6%) > 灌木林 (42.1%) > 青海云杉林 (36.3%)，平均为 40.5%。20 ~ 40 cm

土层有机碳密度所占比例大小顺序为青海云杉林 (36.2%) > 灌木林 (29.5%) > 草地 (29.1%)，平均为 31.6%。40 ~ 60 cm 土层有机碳密度所占比例大小顺序为青海云杉林 (33.0%) > 灌木林 (28.4%) > 草地 (22.4%)，平均为 27.9%。

可见,3种植被类型0~20 cm土层储存的有机碳均大于其它土层,其所占比重变化范围为36.3%~48.6%。随土层的加深,3种植被类型土壤有机碳所占比重变化存在差异,其中青海云杉林土壤有机碳所占比重介于30.84%~36.15%之间,变化幅度相对较小;灌木林和草地土壤有机碳所占比重随土层加深逐渐减小,40~60 cm土壤有机碳所占比例最小。3种植被类型0~40 cm土层有机碳密度占整个剖面的60%以上(66.99%~77.56%)。

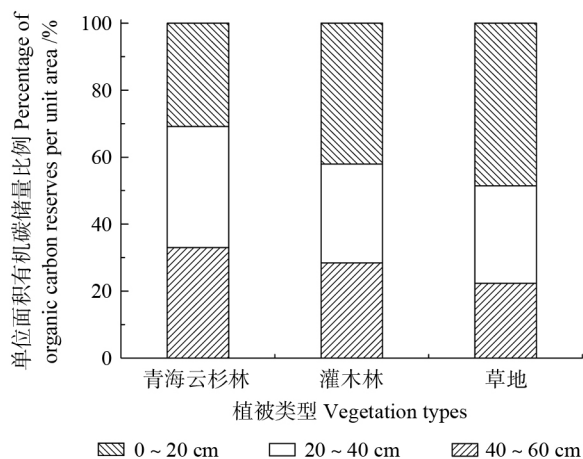


图1 不同植被类型各土层有机碳密度占全剖面(0~60 cm)土壤密度的比例

Fig.1 Percentages of soil organic carbon density of soil layer in whole vertical section (0-60 cm) in different vegetation types

3 结论与讨论

3.1 结论

1) 3种植被类型0~60 cm土层土壤有机碳含量和密度均表现为青海云杉林>灌木林>草地。说明在同一区域不同植被类型土壤有机碳储存和积累存在差异,祁连山区青海云杉林更有利于土壤有机碳的储存和积累。

2) 不同植被类型土壤有机碳含量及密度垂直分布具有较为明显的层次性,但不同植被类型存在差异。青海云杉林土壤有机碳含量及密度随土层加深呈先增大后减小趋势,灌木林和草地土壤有机碳含量及密度在表层(0~10 cm)最大,随土层加深逐渐减小,说明这2种植被土壤有机碳含量及密度具有明显的“表聚作用”。

3) 3种植被类型0~40 cm土层有机碳密度占整个剖面的60%以上(66.99%~77.56%),说明研究区40 cm以下土壤有机碳密度较小,在以后的研究中应该重点加强对表层土壤的研究。

3.2 讨论

土壤碳库含量受植被凋落物分解输入和土壤本身呼吸作用输出的影响^[25]。森林类型或植被组成不仅直接影响凋落物的产量和质量,而且间接影响土壤微生物活动的微环境^[26]。植被类型不同,其物种组成、凋落物类型、产量和质量也不同,对森林土壤碳汇/源功能的影响也不同^[27]。本研究发现3种植被类型土壤有机碳含量大小顺序为青海云杉林>灌木林>草地,这是因为3种植被类型虽处在同一个海拔地段,但是青海云杉林分布在阴坡,且由于树冠遮蔽造成林内温度相比其他两种植被要低,加上林内湿度较大,抑制了土壤中微生物的活性,很大程度地影响了土壤中动物残体和植物残体的分解与释放,最终大部分的残体以有机物的形式沉积在土壤里面,而草地分布在阳坡,其土壤表面温度较高,湿度相对较低,加速了土壤中有有机质的分解,不利于土壤有机碳的积累。植被类型对土壤有机碳分布有着重要的影响,本研究仅选择研究区海拔2 900 m处的3种典型植被研究了土壤有机碳的分布情况,尽管这3种植被类型是组成祁连山森林植被的重要部分,但为了更全面地反映研究区不同植被类型土壤有机碳的分布情况,应在以后的研究中根据植被的分布状况布设更多的样地进行研究,从而提高结果的可信度。

受凋落物、根系分布以及人为活动的影响,土壤有机碳含量垂直分布特征存在差异,其中青海云杉林土壤有机碳含量呈先增大后减小的趋势。这是因为对青海云杉而言,地上凋落物是土壤有机碳输入的主要方式,调查发现该区域青海云杉林腐殖质层厚度为10~20 cm,该土层形成了明显的有机质层,土壤有机碳含量较高;随着土层深度的增加,青海云杉根系的密度逐渐减小,再者土壤水分含量逐渐减小,土壤温度逐渐降低,土壤微生物活性受到抑制,土壤有机碳含量减小。此研究结果与赵维俊等^[28]在祁连山大野口流域的研究稍有不同。造成这种差异的原因是,尽管研究都在祁连山地区进行,但是不同的研究区域其海拔、气温、降水、植被等条件存在差别,而土壤有机碳的分布不仅与植被类型有关,而且与气候、土壤质地、土壤性质及人为活动有密切的关系。因此,即使研究区域相同、植被类型相同,但研究地点不同其结果也可能存在差异。灌木林和草地土壤有机碳含量随土层加深呈逐渐减小的趋势,这与王凤等^[29]、袁子茹等^[30]的研究结果相似。研

究区灌木林主要有金露梅、苔草、老鹳草等组成,林下的草本比较茂盛,物种丰富,凋落物构成丰富,分解速度快,一定程度上增加了碳源的输入,且地下浅层根系密集,土壤养分富集,表层有机碳含量较高;随着土层的加深,灌木林根系数量减少,土壤透气性降低,微生物分解活性减弱,土壤有机碳含量减小。根系是草地土壤有机碳输入的主要形式,且在半干旱山区,土壤水分对草地土壤有机碳的累积起到主导作用^[13],随着土层深度的增加,根系分布减少,土壤水分含量逐渐降低,土壤有机碳含量逐渐减小。土壤有机碳的垂直分布受众多因素的影响,本研究只是简单分析了不同植被类型土壤有机碳的剖面分布规律,而没有同步监测气温、降水、土壤属性等因子,进而研究土壤有机碳垂直分布差异的内在机理,这在往后的研究中需要加强。

本研究还发现,0~20 cm和0~40 cm土层有机碳密度分别占整个剖面的40.5%和72.7%,这接近于秦岭地区(46.14%以上和73.31%以上)^[31],但是低于重庆缙云山(49.85%以上和82.65%以上)^[32]、大兴安岭(0~10 cm土层84.70%以上)^[26]和长白山(0~40 cm土层80%以上)^[33]。其主要原因可能是该区域的生长季节,气温相对较高,降雨较多,使得淋溶过程加剧,分解速度变快,从而加速了森林凋落物的分解与输入,导致土壤中的有机碳溶解并向下层转移;再者,在雨水冲刷过程中,部分土壤有机碳以二氧化碳的形式矿化释放到大气中,减少了土壤有机碳总量^[34]。

参考文献:

- [1] AMUNDSON R. The carbon budget in soils[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 2001,29(1):535-562.
- [2] DORJI T, ODEH I O A, FIELD D J, *et al.* Digital soil mapping of soil organic carbon stocks under different land use and land cover types in montane ecosystems, eastern Himalayas[J]. Forest Ecology & Management, 2014,318:91-102.
- [3] WINOWIECKI L, VAHEN T G, HUISING J. Effects of land cover on ecosystem services in Tanzania: a spatial assessment of soil organic carbon[J]. Geoderma, 2016,263:274-283.
- [4] HOUGHTON R A. Land-use change and the carbon cycle[J]. Global Change Biology, 1995,1(4):275-287.
- [5] 杨万勤,张健,胡庭兴,等.森林土壤生态学[M].成都:四川科学出版社,2006:1-2.
YANG W Q, ZHANG J, HU T X, *et al.* Forest soil ecology[M]. Chengdu: Sichuan Science Press, 2006:1-2.
- [6] 刘林馨,王健,杨晓杰,等.大兴安岭不同森林群落植被多样性对土壤有机碳密度的影响[J].生态环境学报,2018,27(9):1610-1616.
LIU L X, WANG J, YANG X J, *et al.* Forest plant community and soil organic carbon density in Da Xing'an mountains[J]. Ecology & Environment Sciences, 2018,27(9):1610-1616.
- [7] 陶贞,沈承德,高全洲,等.高寒草甸土壤有机碳储量和CO₂通量[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(4):553-563.
TAO Z, SHEN C D, GAO C Z, *et al.* Soil organic carbon storage and CO₂ flux in alpine meadow[J]. Science in China, (Series D: Earth Sciences), 2007,37(4):553-563.
- [8] 吴雅琼,刘国华,傅伯杰,等.青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究[J].环境科学学报,2008,28(2):362-367.
WU Y Q, LIU G H, FU B J, *et al.* Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in the Tibetan Plateau[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008,28(2):362-367.
- [9] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
HUANG C Y. Soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [10] 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.
WANG L, ZENG H, ZHANG Y J, *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.
- [11] LIU Z P, SHAO M A, WANG Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011,142(3/4):184-194.
- [12] TAN Z X, LAL R, SMECK N E, *et al.* Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables[J]. Geoderma, 2004,121(3/4):187-195.
- [13] 朱猛,冯起,张梦旭,等.祁连山中段草地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J].草地学报,2018,26(6):1322-1329.
ZHU M, FENG Q, ZHANG M X, *et al.* Patterns and influencing factors of soil organic carbon in grasslands of the middle Qilian mountains[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018,26(6):1322-1329.
- [14] 曾立雄,雷蕾,王晓荣,等.海拔梯度对祁连山青海云杉林乔木层和土壤层碳密度的影响[J].生态学报,2018,38(20):7168-7177.
ZENG L X, LEI L, WANG X R, *et al.* Effect of altitudinal variation on carbon density in arbor layer and soil layer of *Picea crassifolia* forest in Qilian mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(20):7168-7177.
- [15] 赵锦梅,高超,张德罡.祁连山东段不同退化高寒草甸土壤有机碳密度研究[J].草地学报,2010,18(1):21-25.
ZHAO J M, GAO C, ZHANG D G. Study on the soil organic carbon density of alpine meadow with different degradation degrees in eastern Qilian mountains[J]. Acta Agrectir Sinica, 2010,18(1):21-25.
- [16] 何志斌,赵文智,刘鹤,等.祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素[J].生态学报,2006,26(8):2572-2577.
HE Z B, ZHAO W Z, LIU H, *et al.* Characteristic of *Picea Crassifolia* forest soil organic carbon and relationship with environment factors in the Qilian mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(8):2572-2577.

- [17] 胡健, 吕一河, 张琨, 等. 祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异 [J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3338-3349.
HU J, LYU Y H, ZHANG K, *et al.* The differences of water conservation function under typical vegetation types in the Pailugou catchment, Qilian mountain, northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3338-3349.
- [18] 张立杰, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山典型小流域降水特征及其对径流的影响 [J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 776-777.
ZHANG L J, ZHAO W Z, HE Z B, *et al.* The characteristics of precipitation and its effects on runoff in a small typical catchment of Qilian mountains[J]. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2008, 30(5): 776-777.
- [19] 刘鹤, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2390-2391.
LIU H, ZHAO W Z, HE Z B, *et al.* Temporal heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in Qilian mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2390-2391.
- [20] 赵维俊, 王顺利, 孟好军, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉种群结构与空间分布格局 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(11): 81-86.
ZHAO W J, WANG S L, MENG H J, *et al.* Population structure and spatial distribution pattern of *Picea crassifolia* in Pailugou basin, Qilian mountains[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, 38(11): 81-86.
- [21] 张万儒, 许本彤. 森林土壤分析方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
ZHANG W R, XU B T. Forest soil analysis method[M]. Beijing: China Standards Press, 1999.
- [22] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [23] 丁访军, 潘忠松, 周凤娇, 等. 黔中喀斯特地区3种林型土壤有机碳含量及垂直分布特征 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 161-164, 169.
DING F J, PAN Z S, ZHOU F J, *et al.* Organic carbon contents and vertical distribution characteristics of the soil in three forest types of the Karst Regions in central Guizhou province[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2012, 26(1): 161-164, 169.
- [24] 梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 889-893.
LIANG Q P, YU X X, PANG Z, *et al.* Study on soil organic carbon density of different forest types[J]. *Ecology & Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 889-893.
- [25] SMITH P, FANG C. Carbon cycle: a warm response by soils[J]. *Nature*, 2010, 464: 499-500.
- [26] 魏亚伟, 于大炮, 王清君, 等. 东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3333-3340.
WEI Y W, YU D P, WANG Q J, *et al.* Soil organic carbon density and its influencing factors of major forest types in the forest region of northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12): 3333-3340.
- [27] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2889-2895.
YANG W Q, DENG R J, ZHANG J. Forest litter decomposition and its responses to global climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [28] 赵维俊, 刘贤德, 张学龙, 等. 祁连山青海云杉 (*Picea crassifolia*) 林土壤有机碳与化学性质的相互关系 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1565-1571.
ZHAO W J, LIU X D, ZHANG X L, *et al.* Relationship between soil organic carbon content and chemical properties of *Picea crassifolia* forest in the Qilian mountains[J]. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2014, 36(6): 1565-1571.
- [29] 王凤, 孟浩峰, 侯德明, 等. 黑河上游冰沟流域3种林地土壤有机碳分布特征与土壤特性的关系 [J]. 草业科学, 2015, 32(4): 640-646.
WANG F, MENG H F, HOU D M, *et al.* Relationship between soil organic carbon distribution and soil properties among three woodlands at ice valley in the upper reaches of Heihe basin[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(4): 640-646.
- [30] 袁子茹, 任灵, 陈建纲, 等. 祁连山不同草地类型土壤有机质与全氮分布的关系 [J]. 草原与草坪, 2016, 36(3): 12-16.
YUAN Z R, REN L, CHEN J G, *et al.* Relationship between soil organic matter and total nitrogen in different types of grassland on Qilian mountain[J]. *Grassland & Turf*, 2016, 36(3): 12-16.
- [31] 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1569-1577.
WANG D, GENG Z C, SHE D, *et al.* Vertical distribution of soil active carbon and soil organic carbon storage under different forest types in the Qiliang mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1569-1577.
- [32] 刘楠, 王玉杰, 王毅力, 等. 重庆缙云山典型林分土壤有机碳密度特征 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1492-1496.
LIU N, WANG Y J, WANG Y L, *et al.* Soil organic carbon density of 4 forest types in Jinyun mountain of Chongqing[J]. *Ecology & Environment*, 2009, 18(4): 1492-1496.
- [33] 刘玲, 王海燕, 戴伟, 等. 长白山东部4种林分类型土壤有机碳及养分特征研究 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 79-85.
LIU L, WANG H Y, DAI W, *et al.* Characteristics of soil organic carbon and nutrients under four forest stands in eastern part of Changbai mountains[J]. *Bulletin of Soil & Water Conservation*, 2013, 33(3): 79-85.
- [34] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理 [J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.
CHEN Q S, LI L H, HAN X G, *et al.* Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 972-978.

[本文编校: 文凤鸣]