

地形因子对青海祁连圆柏林土壤有机碳空间分布的影响

陈志林¹, 强浪浪², 向安民^{1*}, 田翠翠¹, 庞军柱², 党坤良²

(1. 国家林业和草原局 西北调查规划设计院, 旱区生态水文和灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 做为青海三江源区主要森林类型之一, 祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*) 林提供着重要的生态系统服务功能, 尤其在增加青海省陆地生态系统碳储量方面。以青海祁连圆柏林为研究对象, 采用野外样地调查、室内试验和数理统计相结合的方法, 分析主要地形因子(海拔、坡向、坡位、坡度)对土壤有机碳空间分布的影响。结果表明, 祁连圆柏林土壤有机碳密度均值为 $209.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中, 以兴海中铁林场($247.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)最大, 泽库麦秀林场($158.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)最小, 各区域间存在一定差异。青海祁连圆柏林土壤有机碳密度随海拔增加呈先升后降的趋势, 其中, 以海拔 $3\,500 \sim 3\,700 \text{ m}$ 范围最大, 为 $255.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 海拔 $2\,900 \sim 3\,100 \text{ m}$ 最小, 为 $152.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 土壤有机碳密度随坡度增大而下降, 坡度 $5^\circ \sim 15^\circ$ 最大, 为 $297.22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 下坡位($251.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 中坡位($212.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 上坡位($153.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$); 阳坡土壤有机碳密度($206.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)略低于阴坡($215.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。通过 t 检验, 不同海拔、坡度和坡位间土壤有机碳密度存在差异。总之, 在不同立地因子中, 海拔和坡位是调控祁连圆柏林土壤有机碳密度的主导因子。

关键词: 祁连圆柏林; 土壤有机碳密度; 地形因子; 通径分析; 青海省

中图分类号: S714.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2022)06-0068-07

Effects of Topographical Factors on the Spatial Distribution of Soil Organic Carbon of *Juniperus przewalskii* Forest in Qinghai Province

CHEN Zhi-lin¹, QIANG Lang-lang², XIANG An-min^{1*}, TIAN Cui-cui¹, PANG Jun-zhu², DANG Kun-liang²

(1. Northwest Surveying, Planning and Designing Institute of National Forestry and Grassland Administration,

Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions,

Xian 710048, Shaanxi, China; 2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: As one of the main forest types in Qinghai Province, *Juniperus przewalskii* forest plays critical role in sequestering carbon. This study was performed to investigate spatial distribution of soil organic carbon density (SOCD) of *Juniperus przewalskii* forest in Qinghai Province by soil sampling and laboratory experiments. In addition, the relationships between SOCD and topographical factors (elevation, slope aspect, slope position and slope) were also studied. The results showed that the average SOCD of *Juniperus przewalskii* forest in Qinghai Province was $209.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. Soil in Zhongtie Forest Farm of Xinghai County had the highest SOCD ($247.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) and Maixiu Forest Farm of Zeku County had the lowest SOCD ($158.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) among all the sampling regions. The SOCD initially increased and then decreased with the increase of elevation gradient. The SOCD was the highest at $3\,500 \sim 3\,700 \text{ m}$ ($255.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) elevation range and was the lowest at the $2\,900 \sim 3\,100 \text{ m}$ ($152.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) elevation range. The SOCD in the down slope was higher than those in the middle and up slopes. The SOCD was the highest at $5^\circ \sim 15^\circ$

收稿日期: 2022-05-18 修回日期: 2022-06-16

基金项目: 国家林业和草原局西北林业调查规划设计院“青海柏树生态系统有机碳空间分异特征研究”(LC2-12)。

第一作者: 陈志林, 高级工程师。研究方向: 森林资源监测。E-mail: 562462902@qq.com

* 通信作者: 向安民, 教授级高级工程师。研究方向: 森林生态和资源调查。E-mail: 838441842@qq.com

(297.22 t · hm⁻²) slope gradient. The SOCD of shady slope (215.55 t · hm⁻²) was slightly higher than that of sunny slope (206.72 t · hm⁻²). According to the results of t-test, there were variations of SOCD among different elevations, slope positions and slopes. In summary, elevation and slope position were the dominant topographic factors that affect SOCD of *Juniperus przewalskii* forest.

Key words: *Juniperus przewalskii* forest; soil organic carbon density; path analysis; topographic factors; Qinghai Province

作为陆地土壤有机碳库的重要组成部分,森林土壤有机碳一直是全球森林生态系统碳循环研究的热点^[1-2]。全球森林土壤有机碳约占陆地土壤有机碳总量的 30%~50%^[3],其主要来源有凋落物分解补充、植物根系及其分泌物转化积累、林内动物和土壤微生物残体^[4-5],土壤呼吸作用将有机碳转化为 CO₂ 向大气中释放,研究表明土壤中有有机碳的微小变化,也会使大气中 CO₂ 浓度变化巨大,因此科学管理森林土壤有机碳将有助于减缓全球变暖和有助于我国碳达峰和碳中和目标的实现^[6-8]。

有关森林土壤有机碳储量、碳密度及地形因子对其调控的研究一直是生态学家、土壤学家、环境科学家和林学家关注的焦点。森林土壤碳储量在空间上的变异很大,主要受到海拔、坡向、坡位和坡度等地形因子的影响^[9-10]。地形主要通过调控土壤水分、热量在时空上的分配进而对森林凋落物的生产和分解产生影响,以及土壤侵蚀等来影响土壤有机碳的储量^[11-13]。

青海三江源区既是我国至关重要的水源涵养区,又是重要的生态屏障。准确估算该地区森林土壤碳储量,对于青海省乃至全国实施绿色发展的理念具有重要意义。做为青海三江源区主要森林类型之一,祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)林提供着重要的生态系统服务功能,尤其在增加青海省陆地生态系统碳储量方面发挥着非常重要的作用,强浪浪等^[14]研究了青海祁连圆柏林乔木层碳密度空间分异特征,井赛等^[15]分析了青海祁连圆柏林土壤 C、N、P 化学计量比对海拔与土层的响应及其与环

境因子的关系,但有关青海三江源区祁连圆柏林土壤碳密度的研究尚少。本研究通过在青海三江源区较大尺度的野外调查、采样,及在室内测定分析土壤有机碳含量和密度,分析主要地形因子(海拔、坡向、坡位、坡度)对土壤有机碳空间分布的影响,以期为青海祁连圆柏林的可持续经营和森林生态系统固碳功能的评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

本研究区域选设在祁连圆柏林分布较为广泛的青海省海北州祁连县、黄南州泽库县、海西州德令海市、都兰县和乌兰县及海南州兴海县。研究区域地理坐标为 95°34′—102°08′E, 34°48′—39°10′N。海拔 2 915~3 870 m。气候为高原气候,年平均气温 -2.5~7.9℃,年降水量 175~600 mm,降水集中于 5—9 月,林下土壤类型多为山地草甸土和山地棕钙土。主要成林树种有祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albosinensis*)等。主要灌木有千里香杜鹃(*Rhododendron thymifolium*)、高山绣线菊(*Spiraea alpina*)、青甘锦鸡儿(*Caragana tangutica*)、西藏忍冬(*Lonicera rupicola*)等。主要草本植物有针茅(*Stipa capillata*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、藁草(*Carex duriuscula*)、蕨麻(*Potentilla anserina*)等。不同研究区域的基本概况详见表 1。

表 1 研究区概况
Table 1 Primary characteristics of the study region

样点	样本数	经纬度	海拔/m	气候条件			林分状况				土壤概况		
				年均温度/℃	年降水量/mm	无霜期/d	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度/(株·hm ⁻²)	郁闭度	土壤类型	土壤厚度/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)
祁连县八宝镇	8	38°04′44″—38°12′49″N 100°14′55″—100°18′35″E	3 180~3 410	2.8~7.9	280~400	69~184	15.6~30.8	4.3~8.1	225~825	0.2~0.65	山地草甸土、 山地灰褐土	60~110	0.63~0.93
兴海县中铁林场	24	35°00′26″—35°13′20″N 100°6′23″—100°8′33″E	3 140~3 581	0.8~5.9	240~600	41~78	12.5~46.4	5.2~13.1	350~1 200	0.25~0.7	山地草甸土、 山地棕钙土	50~100	1.10~1.12
德令海市柏树园	6	37°29′11″—37°29′25″N 97°19′40″—97°20′50″E	3 571~3 740	3.7~6.5	176~410	84~99	27.0~39.5	3.1~6.8	175~450	0.1~0.45	灰棕漠土、盐 化棕钙土	70~120	0.68~1.02
都兰县热水乡	17	35°59′18″—36°16′50″N 98°6′31″—98°20′10″E	3 720~3 870	-2.5~5.1	175~400	80~100	20.5~42.9	2.5~7.9	325~975	0.2~0.6	山地草甸土、 山地棕钙土	50~100	0.86~1.01
乌兰县哈里哈图国家森林公园	12	37°1′10″—37°2′34″N 98°36′55″—98°39′57″E	3 360~3 710	3.5	178~430	90~97	21.9~39.7	5.0~8.1	325~625	0.25~0.6	山地草甸土、 灰棕漠土	60~120	0.71~1.01
泽库县麦秀林场	29	35°12′52″—35°18′40″N 101°51′06″—101°56′42″E	2 915~3 500	-2.4~2.8	277~530	36~74	9.6~31.4	3.8~11.6	375~1 700	0.3~0.75	山地草甸土、 山地棕钙土	50~105	0.80~1.02

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2018 年至 2020 年 7、8 月,在青海省祁连圆柏林分布较为广泛的区域,按照不同海拔、不同坡向、不同坡度和不同坡位,设置样地 96 个,每个样地面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。其中兴海县中铁林场(XH)24 个、都兰县热水乡(DL)17 个、乌兰县哈里哈图国家森林公园(WL)12 个、德令哈市柏树园(DLH)6 个、泽库县麦秀林场(ZK)29 个、祁连县八宝镇(QL)8 个。利用 GPS 确定各样地的经纬度,用海拔仪和罗盘仪测定各样地所处的海拔、坡度、坡位和坡向,并进行每木检尺记录胸径、树高、林分密度、郁闭度等林分因子。

1.2.2 土壤样品采集与测定 在每个样地内按照“S”形取样法选取土壤样点 5 个,先去除表层的凋落物,然后挖掘土壤剖面,深度为 60 cm,按照每 10 cm 为 1 层,均匀分为 6 层,每层分别取样,将土样密封保存,带回实验室风干。另外,在所挖的剖面,用体积为 100 cm^3 的环刀采集各层原状土,土样风干后挑出植物残体和肉眼可见的石砾,石砾体积用量筒排水法测定;另取风干土样,研磨后过 200 目筛,用重铬酸钾容量法-外加热法(GB 7857-87)测定土壤有机碳。土壤有机碳密度计算公式^[16]如下:

$$S_{\text{Ocd}} = \sum_{i=1}^n \frac{(1-\theta) \times c_i \times d_i \times \rho_i}{10} \quad (1)$$

式中: S_{Ocd} 为土壤剖面的有机碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), $n=6$, θ_i 为第 i 层 $>2\text{ mm}$ 的石砾含量(%), c_i 为第 i 土层的有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), d_i 为第 i 土层的厚度:10 cm, ρ_i 为第 i 层的土壤平均容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

1.2.3 立地因子划分 根据调查区域地形条件,并参考《西北主要树种培育技术》^[17] 的森林立地划分方法,划分立地条件等级。海拔划分为 5 个等级:2 900~3 100 m (Z_{11})、3 100~3 300 m (Z_{12})、3 300~3 500 m (Z_{13})、3 500~3 700 m (Z_{14})、3 700~3 900 m (Z_{15});坡向划分为 2 个等级:阳坡(正南、西南、东南和正西, Z_{21})、阴坡(正北、东北、西北和正东, Z_{22});坡度划分为 4 个等级:缓坡($5^\circ \sim 15^\circ$, Z_{31})、斜坡($15^\circ \sim 25^\circ$, Z_{32})、陡坡($25^\circ \sim 35^\circ$, Z_{33})、急坡($35^\circ \sim 45^\circ$, Z_{34});坡位划分为 3 个等级:上坡位(Z_{41})、中坡位(Z_{42})、下坡位(Z_{43})。

1.2.4 数据处理 用 SPSS23.0 软件进行数据处理,采用 t 检验揭示不同区域和不同立地条件的祁连圆柏林土壤碳密度差异特征。通过多元回归分析、线性相关分析、通径分析和逐步回归分析,筛选出调控祁连圆柏林土壤碳密度的主导立地因子。通径分析和决策系数计算:分别以海拔、坡向、坡位、坡度为自变量,土壤有机碳密度为因变量,用

SPSS23.0 软件进行通径分析。综合判定自变量(地形因子)与因变量(土壤有机碳密度)的相关性^[18-19],利用决策系数解释影响土壤有机碳密度的主要地形因子和次要因子^[20-21]。决定系数计算公式如下

$$R^2(i) = 2p_i \cdot r_{ij} - p_i^2 \quad (2)$$

式中: $R^2(i)$ 为因子 i 的决定系数, p_i 为通径系数(直接作用), r_{ij} 为与 Y 简单相关系数。

2 结果与分析

2.1 青海祁连圆柏林土壤有机碳密度总体特征

青海祁连圆柏林土壤有机碳密度均值为 $209.57\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,变异系数为 0.35,说明祁连圆柏林土壤有机碳密度空间变异较大(表 2)。土壤有机碳密度随土壤深度增加呈减小的趋势,0~10 cm 最大,为 $43.67\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,50~60 cm 最小,为 $23.38\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤有机碳密度分别占土壤(0~60 cm)总有机碳密度的 40.89%、34.38%和 24.73%,0~40 cm 的土壤有机碳密度占比达 75.27%,表明 0~60 cm 土层中 0~40 cm 是构成土壤有机碳密度的主体。0~10、10~20 cm 和 20~30 cm 土层土壤有机碳密度显著高于 30~40、40~50、50~60 cm 土层($P < 0.05$),30~40 cm 土层有机碳密度也显著高于 50~60 cm 土层($P < 0.05$)(表 2)。

表 2 青海祁连圆柏林土壤有机碳密度总体特征

Table 2 Characteristics of soil carbon density in

J. przewalskii forest in Qinghai Province

土壤层/cm	样本数	均值/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	标准误	变异系数	占比 (%)
0~10	96	43.67a	16.55	0.39	20.85
10~20	96	42.01a	19.97	0.46	20.04
20~30	96	39.09a	16.84	0.43	18.65
30~40	96	32.96b	12.20	0.37	15.73
40~50	96	28.45bc	10.84	0.38	13.57
50~60	96	23.38c	9.51	0.41	11.16
总和	96	209.56	73.72	0.35	100

注:表中不同小写字母表示存在显著差异($P < 0.05$)。下表同。

2.2 不同区域土壤有机碳密度差异特征

不同区域土壤有机碳密度,XH($247.37\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>WL($244.79\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>QL($237.22\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>DLH($211.98\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>DL($174.45\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>ZK($158.96\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)(表 3)。 t 检验结果表明,QL 与 DL、ZK 均呈显著差异($P < 0.05$),XH 与 DL、ZK 均呈极显著差异($P < 0.01$),WL 与 DL、ZK 差异极显著($P < 0.01$)。

2.3 立地因子对土壤有机碳密度的调控

2.3.1 海拔的调控 随海拔升高,祁连圆柏林土壤

有机碳密度先逐渐增加然后减小(图 1)。在海拔 2 900~3 100 m,土壤有机碳密度最低,为 152.03 t·hm⁻²,随海拔升高,土壤有机碳密度逐渐增加,在海拔 3 500~3 700 m 达到最大值,为 255.93 t·hm⁻²;当海拔超过 3 700 m 时,土壤有机碳密度降

低。*t* 检验结果发现,土壤有机碳密度在海拔 3 500~3 700 m 与海拔 2 900~3 100 m 呈极显著差异($P<0.01$),同时与海拔 3 700~3 900 m 土壤有机碳密度差异显著($P<0.05$)(表 4)。

表 3 青海祁连圆柏不同分布区土壤有机碳密度

Table 3 Soil organic carbon density of *J. przewalskii* forest in different regions in Qinghai Province

研究区域	样本数	土壤有机碳密度 (t·hm ⁻²)	t-检验				
			QL	XH	DLH	DL	WL
QL	8	237.22					
XH	24	247.37	-0.326				
DLH	6	211.98	0.548	0.833			
DL	17	174.45	2.599*	3.074**	1.096		
WL	12	244.79	-0.253	0.085	-0.756	-3.111**	
ZK	29	158.96	2.534*	3.461**	1.247	0.660	2.873**

注: * 表示 $\alpha=0.05$; ** 表示 $\alpha=0.01$ 。下表同。

表 4 海拔对青海祁连圆柏林土壤有机碳密度的调控

Table 4 Effects of altitude on soil organic carbon density of *J. przewalskii* forest in Qinghai Province

海拔/m	样本数	土壤有机碳密度 (t·hm ⁻²)	t-检验			
			Z ₁₁	Z ₁₂	Z ₁₃	Z ₁₄
2 900~3 100	14	152.03				
3 100~3 300	20	213.04	0.514			
3 300~3 500	7	223.71	-1.270	1.866		
3 500~3 700	25	255.93	-2.633*	-1.768	1.318	
3 700~3 900	30	209.57	-1.342	0.449	1.292	2.671*

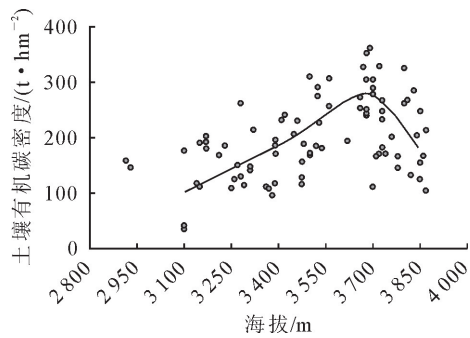


图 1 青海祁连圆柏林土壤有机碳密度与海拔的关系

Fig.1 The relationship between soil organic carbon density of *J. przewalskii* forest and altitude in Qinghai Province

2.3.2 坡向的调控 阳坡的土壤有机碳密度(206.72 t·hm⁻²)低于阴坡(215.55 t·hm⁻²),但差异不显著(表 5)。

表 5 坡向对青海祁连圆柏林土壤有机碳密度的调控

Table 5 Effects of slope aspect on soil organic carbon density of *J. przewalskii* forest in Qinghai Province

坡向	样本数	土壤有机碳密度 (t·hm ⁻²)	t 检验 Z21
阳坡	70	206.72	
阴坡	26	215.55	-0.438

2.3.3 坡度的调控 土壤有机碳密度随坡度增大

逐渐减小(图 2),在坡度 5°~15°最大,为 297.22 t·hm⁻²。*t* 检验结果表明,坡度 5°~15°的土壤有机碳密度与坡度 25°~35°、35°~45°差异极显著($P<0.01$)与坡度 15°~25°差异显著($P<0.05$)(表 6);坡度 15°~25°与坡度 35°~45°的土壤有机碳密度呈极显著差异($P<0.01$)。

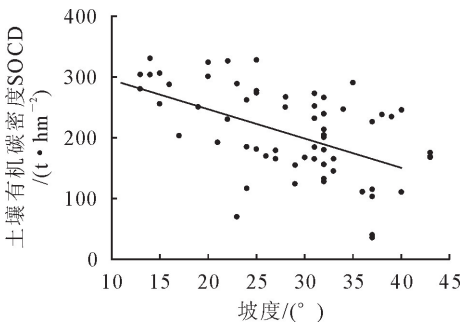


图 2 青海祁连圆柏林土壤碳密度与坡度的关系

Fig.2 The relationships between soil organic carbon density of *J. przewalskii* forest and slope in Qinghai Province

2.3.4 坡位的调控 不同坡位土壤有机碳密度,下坡位(251.76 t·hm⁻²)>中坡位(212.56 t·hm⁻²)>上坡位(153.24 t·hm⁻²)。 *t* 检验结果表明,上坡位的土壤有机碳密度分别与中坡位和下坡位呈极显著差异($P<0.01$)(表 7);中坡位与下坡位的土壤

有机碳密度差异显著($P < 0.05$)。

表 6 坡度对青海祁连圆柏林土壤有机碳密度的调控

Table 6 Effects of slope on soil organic carbon density of *J. przewalskii* forest in Qinghai Province

坡度	样本数	土壤有机碳密度 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	<i>t</i> 检验		
			Z_{31}	Z_{32}	Z_{33}
Z_{31}	8	297.22			
Z_{32}	13	244.48	2.241 *		
Z_{33}	50	198.62	7.086 **	2.003	
Z_{34}	25	152.44	6.379 **	3.138 **	2.095

表 7 坡位对青海祁连圆柏林土壤有机碳密度的影响

Table 7 Effects of slope position on soil organic carbon density of *J. przewalskii* forest in Qinghai Province

坡位	样本数	土壤有机碳密度 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	<i>t</i> 检验	
			Z_{41}	Z_{42}
Z_{41}	20	153.24		
Z_{42}	33	212.56	-3.107 **	
Z_{43}	43	251.76	-4.369 **	-2.108 *

2.4 土壤有机碳密度与立地因子的关系

海拔、坡位与土壤有机碳密度显著相关($P < 0.05$)(表 8)。海拔与土壤有机碳密度呈负相关,简单相关系数为-0.576,直接相关系数为-0.419;坡度与土壤有机碳密度呈正相关,简单相关系数为0.521,直接相关系数为0.306;海拔与土壤有机碳密度简单相关系数、直接相关系数值均大于坡位的,表明海拔对土壤有机碳密度的影响大于坡位。但间接作用系数坡位又高于海拔,因此进行决定系数判定,结果表明,海拔的决定系数($R^2_{\text{海拔}} = 0.307$)大于坡位的($R^2_{\text{坡位}} = 0.225$),说明对调控土壤有机碳密度的因子综合排序:海拔>坡位。

表 8 土壤有机碳密度通径分析

Table 8 Path analysis of soil organic carbon density

因子	相关系数	通径系数 (直接作用)	间接通径系数(间接作用)	
			海拔	坡位
海拔	-0.576	-0.419	—	0.215 785
坡位	0.521	0.306	-0.157 59	—

3 结论与讨论

3.1 结论

青海祁连圆柏林土壤有机碳密度均值为 $209.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中以兴海中铁林场($247.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)最大,泽库麦秀林场($158.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)最小,各区域间存在显著或极显著差异($P < 0.05$, $P < 0.01$)。

祁连圆柏林土壤有机碳密度随海拔升高先升后降,其中,以海拔 $3\,500 \sim 3\,700 \text{ m}$ 范围最大,为

$255.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,海拔 $2\,900 \sim 3\,100 \text{ m}$ 最小,为 $152.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;阳坡土壤有机碳密度($206.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)略低于阴坡($215.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$);土壤有机碳密度随坡度增大而下降,坡度 $5^\circ \sim 15^\circ$ 最大,为 $297.22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;不同坡位土壤有机碳密度,下坡位($251.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>中坡位($212.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>上坡位($153.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$);不同立地因子中,海拔和坡位是影响祁连圆柏林土壤有机碳密度的主导因子。

3.2 讨论

3.2.1 土壤有机碳密度总体特征 随土壤深度增加,青海祁连圆柏林土壤有机碳密度减小,表层土壤($0 \sim 10 \text{ cm}$)有机碳密度最大,且 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 土层碳密度占土壤($0 \sim 60 \text{ cm}$)总有机碳密度的 75.27% ,这与李相楹等^[22]、王振群等^[23]和宋彦彦等^[24]研究结果一致,土壤有机碳密度随土壤深度增加逐渐减小,表层有机碳密度是构成土壤有机碳密度的主体。在祁连圆柏林中,植被凋落物直接累积在土壤表层,成为表层土壤有机碳的主要来源。表层土壤的通气性和水分条件较优,土壤微生物活跃,凋落物分解快,积累了大量的有机碳^[25]。深层土壤的生境劣于表层,与外界物质交换作用弱,其土壤有机碳来源主要为微生物残体、植物根系及根系分泌物,有机碳积累得较少^[26]。耿波等^[27]指出有机质具有表聚性,认为枯落物是森林生态系统最主要的碳源,所以微生物活动主要是在土壤上层,枯枝落叶的分解也主要发生在这里,因此森林表层土壤有机质含量远远高于下两层。兴海中铁林场祁连圆柏林土壤有机碳密度显著高于泽库麦秀林场,这是由于兴海中铁林场所处区域的水热条件要优于泽库麦秀林场所处区域,E. G. Jobbágy 等^[28]指出表层土壤有机碳含量主要受到气候因素的调控。

3.2.2 立地因子对土壤有机碳密度的影响 随海拔升高,祁连圆柏林土壤有机碳密度先升高后降低,其中以海拔 $3\,500 \sim 3\,700 \text{ m}$ 范围最大,为 $255.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,海拔 $2\,900 \sim 3\,100 \text{ m}$ 最小,为 $152.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,主要原因是温度随着海拔升高而下降,导致土壤有机碳释放速率明显降低。曾立雄等^[29]对祁连山不同海拔高度云杉林土壤有机碳进行了研究,发现海拔 $2\,900 \text{ m}$ 土壤有机碳含量最高,而在 $3\,300 \text{ m}$ 开始降低。解宪丽等^[30]认为海拔对土壤有机碳密度也会产生影响,随海拔升高,气温逐渐降低,降水量大体上先是逐步增加,而后又趋于减少,因此土壤有机碳密度也呈现出一定的海拔地带性特征。一般地,植被初级生产力随温度和降水量的增加而增加,然而又由于土壤有机质的分解会受到低温的抑制,随着温度升高土壤呼吸作用增强,有机质的分解

加速,同时蒸发量也在增加,所以相比于高温和干旱的环境,低温和潮湿环境的土壤有机碳密度较高。另外,也可能是由于海拔 3 500~3 700 m 范围是祁连圆柏的适生区,使得祁连圆柏通过凋落物和根系分泌物,归还给土壤的有机质更多一些。

阳坡土壤有机碳密度($206.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)略低于阴坡($215.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),与阳坡相比,阴坡光照时间短因而温度较低,进而致使微生物对土壤有机质分解的速率降低,促进了土壤有机碳的累积。R. P. Griffiths 等^[31]指出阴坡土壤有机质的积累是由于其本身分解速率的降低和植被初级生产力的增加。S. A. Rezaei 等^[32]也认为土壤有机碳含量阴坡明显高于阳坡,这是由于相比于阴坡,阳坡地温较高,导致其土壤水分蒸发较快,进而致使植物生长减缓和较高的土壤有机质矿化速率。

土壤有机碳密度随坡度增大而下降,坡度 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 最大,为 $297.22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,不同坡度土壤有机碳密度出现差异主要是由于土层厚度的差异和重力的作用。侯琳等^[33]认为随坡度的增大,土层变薄,而重力和淋洗作用变强,这样更加不利于土壤有机质的积累,因而土壤有机碳含量也就越低。

不同坡位土壤有机碳密度,下坡位($251.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 中坡位($212.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 上坡位($153.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),下坡位土壤有机碳含量高的原因是一方面富碳的土壤物质的沉积,另一方面缓慢的土壤矿化过程^[34-36]。姜航等^[37]认为相比于上坡位和中坡位,重力和淋洗作用导致下坡位土层较厚,并且土壤有机质聚集,因此有机碳含量较高。

通径分析表明,不同立地因子中,海拔和坡位是调控祁连圆柏林土壤有机碳密度的主导因子。海拔主要通过调控水热条件,进而影响祁连圆柏林碳的积累。坡位引起的土层厚度变化及对土壤有机物质的重力作用是造成土壤碳密度差异的重要因素。姜航等^[37]研究了帽儿山次生林区土壤有机碳密度,发现坡位是土壤有机碳数量分异的主导因子。Zhou. X 等^[38]也发现坡位是对张广才山次生林区的土壤有机碳密度影响的主导地形因子。而唐朋辉^[39]研究了不同地形因子对秦岭南坡红桦林土壤碳密度的影响,发现海拔、坡度、林分密度和郁闭度是影响秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度的主要因子。王强等^[40]在秦岭辛家山林区的研究也表明高海拔地区土壤有机碳显著高于低海拔地区。

参考文献:

[1] Ozrojas M M, Jordán A, Zavala L M, *et al.* Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses

(Southern Spain)[J]. *Solid Earth*, 2012, 3(2): 375-386.

[2] 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* [J]. *Geoderma*, 2006, 135(135): 335-344.

[3] 周国模, 刘恩斌, 余光辉. 森林土壤碳库研究方法进展[J]. *浙江农林大学学报*, 2006, 23(2): 207-216.

ZHOU G M, LIU E B, SHE G H. Summary of estimated methods on forest soil's carbonpool[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2006, 23(2): 207-216. (in Chinese)

[4] 王淑平. 土壤有机碳和氮的分布及其对气候变化的响应[D]. 北京: 中国科学院大学, 2003.

[5] 周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1867-1874.

ZHOU X Y, ZHANG C Y, GUO G F. Effects of climate change on forest soil organic carbon storage: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1867-1874.

[6] 周国逸. 中国森林生态系统固碳现状、速率和潜力研究[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(4): 279-281.

[7] 方精云. 碳中和的生态学透视[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(11): 1173-1176.

[8] YANG Y H, SHI Y, SUN W J, *et al.* Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Science China: Life Sciences*, 2022, doi: 10. 1007/ s11427-021-2045-5.

[9] KULMATISKI A, VOGT D J, SICCAMA T G, *et al.* Landscape determinants of soil organic carbon and nitrogen in Southern New England[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2004, 68: 2014-2022.

[10] YOO K, AMUNDSON R, HEIMSATH A M, *et al.* Spatial patterns of soil organic carbon on hillslopes: integrating geomorphic processes and the biological C cycle[J]. *Geoderma*, 2006, 130: 47-65.

[11] HONTORIA C, RODRIGUEZ-MURILLO C, SAA A. Relationship between soil organic carbon and site characteristics in peninsular Spain[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1999, 63: 614-621.

[12] TAN Z X, LAL R, SMECK N E, CALHOUN F G. Relationship between surface soil organic carbon pool and site variables[J]. *Geoderma*, 2004, 121: 187-195.

[13] WANG S F, WANG X K, OUYANG Z Y. Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(3): 387-395.

[14] 强浪浪, 陈志林, 党坤良, 等. 青海祁连圆柏林乔木层碳密度空间分异特征[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2021, 49(5): 31-39.

QIANG L L, CHEN Z L, DANG K L, *et al.* Spatial variation characterization of arbor layer carbon density in *Juniperus przewalskii* forest in Qinghai[J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.*, 2021, 49(5): 31-39. (in Chinese)

[15] 井赛, 陈志林, 侯晓巍, 等. 青海省祁连圆柏天然林林地土壤生态化学计量特征[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(6): 1-8.

JIANG S, CHEN Z L, HOU X W, *et al.* Soil ecological stoi-

- chiometry characteristics of *Juniperus przewalskii* natural forest lands in Qinghai, China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(6): 1-8. (in Chinese)
- [16] 卫玮, 党坤良. 秦岭南坡林地土壤有机碳密度空间分异特征[J]. 林业科学, 2019, 55(5): 11-19.
- WEI W, DANG K L. Spatial variation of the density of soil organic carbon in forest land on the southern slope of Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(5): 11-19. (in Chinese)
- [17] 罗伟祥, 刘广全, 李嘉珏. 西北主要树种培育技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 238-245.
- [18] 张琪, 丛鹏, 彭励. 通径分析在 Excel 和 SPSS 中的实现[J]. 农业网络信息, 2007, 37(3): 109-110.
- [19] 宫璇, 张如莲, 曹红星. 4 个椰子品种光合、蒸腾作用日变化特征及影响因素[J]. 热带作物学报, 2011, 32(2): 221-224.
- [20] 袁志发, 周静宇, 郭满才. 决策系数: 通径分析中的决策指标[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(5): 131-133.
- YUAN Z F, ZHOU J Y, GUO M C. Decision coefficient-the decision index of path analysis[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2001, 29(5): 131-133. (in Chinese)
- [21] 罗永忠, 成自勇. 水分胁迫对紫花苜蓿叶水势、蒸腾速率和气孔导度的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(2): 215-221.
- [22] 李相楹, 张维勇, 刘峰, 等. 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 19-24.
- [23] 王振群, 乔有明, 段中华. 青海湖南岸不同覆被类型土壤碳氮含量比较[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2008, 19(5): 54-58.
- WANG Z Q, QIAO Y M, DUAN Z H. Comparisons of soil carbon and nitrogen content under different land cover in the southern region of the Qinghai Lake[J]. Journal of Qinghai University: Nat. Sci. Ed., 2008, 19(5): 54-58. (in Chinese)
- [24] 宋彦彦, 张言, 赵忠林, 等. 长白山西部不同林型土壤有机碳和全氮的分布特征[J]. 西北林学院学报, 2018, 36(6): 39-44.
- SONG Y Y, ZHANG Y, ZHAO Z L, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen of different forest types in the West of Changbai Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 36(6): 39-44. (in Chinese)
- [25] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 等. 中国东北样带 (NECT) 土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2002, 28(5): 513-517.
- [26] 邓仁菊, 杨万勤, 张健, 等. 川西亚高山森林土壤有机层碳、氮、磷储量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 7(4): 492-496.
- DENG R J, YANG W Q, ZHANG J, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus storage in soil organic layer of the subalpine forests in Western Sichuan[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2007, 7(04): 492-496. (in Chinese)
- [27] 耿波, 岳亚军. 红河谷不同林分土壤养分状况研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 90-92.
- GENG B, YUE Y J. Research on soil nutrient status under different stands in the Red River Valley[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 90-92. (in Chinese)
- [28] JOBBÁGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological Application, 2000, 10(2): 23-436.
- [29] 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 *Pinus crassifolia* forest in Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7168-7177. (in Chinese)
- [30] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687-699.
- XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 687-699. (in Chinese)
- [31] GRIFFITH R P, MADRITCH M D, SWANSON A K. The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): implications for the effects of climate change on soil properties [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257, 1-7.
- [32] REZAEI S A, GILKES R J. The effects of landscape attributes and plant community on soil chemical properties in rangelands[J]. Geoderma, 2005, 125, 167-176.
- [33] 侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 等. 秦岭火地塘天然次生油松林土壤有机碳的特征[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(8): 156-160.
- HOU L, LEI R D, WANG D X, et al. Traits of soil organic carbon density in *Pinus tabulaeformis* secondary forest at Huoditang valley forest area in Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2008, 36(8): 156-160. (in Chinese)
- [34] CHAPLOT V, BOUAHOM B, VALENTIN C. Soil organic carbon stocks in Laos: spatial variations and controlling factors[J]. Global Change Biology, 2010, 16: 1380-1393.
- [35] JANZEN H H. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 419-424.
- [36] GREGORICH E G, GEER K J, ANDERSON D W, et al. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects[J]. Soil Tillage Research, 1998, 47: 291-302.
- [37] 姜航, 高菲, 崔晓阳. 帽儿山次生林区土壤有机碳密度及地形因子的影响[J]. 森林工程, 2015, 31(3): 15-20.
- [38] ZHOU X, JIANG H, SUN J B, et al. Soil organic carbon density as affected by topography and physical protection factors in the secondary forest area of Zhangguangcai Mountains, northeast China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(4): 94-106.
- [39] 唐朋辉. 秦岭南坡红桦林生态系统碳密度及其影响因素[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2014.
- [40] 王强, 韩欢, 耿增超, 等. 秦岭辛家山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 35-42.
- WANG Q, HAN H, GENG Z C, et al. Distribution characteristics of active soil organic carbon under typical vegetation types in Xinjiashan forest in Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 35-42. (in Chinese)