

祁连山中段青海云杉林土壤有机碳分布特征及影响因素

冯金元¹, 蒋志成², 蒋志仁³, 赵维俊⁴, 王军梅⁵

(1. 甘肃祁连山国家级自然保护区夏玛自然保护区, 甘肃 天祝 733000; 2. 甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心, 甘肃 张掖 734000; 3. 甘肃祁连山国家级自然保护区祁连自然保护区, 甘肃 武威 733000; 4. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000; 5. 甘肃祁连山国家级自然保护区乌鞘岭自然保护区, 甘肃 武威 733000)

摘要: [目的] 研究土壤因子和林分因子对祁连山青海云杉林土壤有机碳分布的影响, 以深入理解祁连山区土壤碳循环机制, 并为该地区碳平衡的维持提供科学依据。[方法] 于 2021 年 7 月沿 2 700, 2 900, 3 100 和 3 300 m 海拔梯度设置样地, 采集样地内土壤和林分数据, 通过非参数检验分析不同土层土壤有机碳在海拔间的差异, 使用 Pearson 相关性和线性拟合分析土壤有机碳与土壤 pH 值、容重、质量含水率、温度、郁闭度和林分密度之间的关系, 采用置换多因素方差分析影响土壤有机碳变异的因素。[结果] ① 海拔高度 2 700 m 土壤有机碳含量平均最高, 为 90.12~127.63 g/kg, 海拔 3 100 m 土壤有机碳含量平均最低, 为 62.17~70.50 g/kg。10 cm 土层土壤有机碳含量最高, 为 70.50~127.63 g/kg, 40 cm 土层土壤有机碳含量最低, 为 62.17~90.12 g/kg。② 所有土层土壤有机碳与 pH 值和容重呈显著负相关 ($p < 0.05$), 与温度、郁闭度和林分密度呈显著正相关 ($p < 0.05$), 与质量含水率呈不显著负相关 ($p > 0.05$)。线性拟合关系表现为容重最好, 决定系数为 0.81 ($p < 0.01$), pH 值和温度决定系数分别为 0.57 ($p < 0.01$) 和 0.32 ($p < 0.01$)。③ 随着土层深度增加, 在各因子对土壤有机碳差异的影响中 pH 值的比例在逐渐增加, 容重的影响在逐渐减小, 林分密度影响逐渐增加。[结论] 各土层土壤有机碳随海拔呈现为先降后升的趋势, 表层土壤有机碳变化幅度最大, 深度土壤有机碳变化幅度最小。土壤有机碳与土壤及林分因子相关关系表现为: 容重 > pH 值 > 温度 > 林分密度 > 郁闭度 > 质量含水率。pH 值是形成不同海拔高度间土壤有机碳差异的主要影响因素。

关键词: 土壤有机碳; 土壤因子; 土层深度; 祁连山

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0261-07

中图分类号: S153.6⁺2, S714

文献参数: 冯金元, 蒋志成, 蒋志仁, 等. 祁连山中段青海云杉林土壤有机碳分布特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 261-267. Feng Jinyuan, Jiang Zhicheng, Jiang Zhiren, et al. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon at *Picea crassifolia* forests in middle part of Qilian Mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 261-267. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.001; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.001.

Characteristics and influencing factors of soil organic carbon at *Picea crassifolia* forests in middle part of Qilian Mountains

Feng Jinyuan¹, Jiang Zhicheng², Jiang Zhiren³, Zhao Weijun⁴, Wang Junmei⁵

(1. Qilian Mountain National Nature Reserve, Xiama Nature Reserve, Wuwei, Gansu 733000, China; 2. Gansu Qilian Mountain National Nature Reserve Management Center, Zhangye, Gansu 734000, China; 3. Qilian Mountain National Nature Reserve, Qilian Nature Reserve, Wuwei, Gansu 733000, China; 4. Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China; 5. Qilian Mountain National Nature Reserve, Wushaoling Mountain Nature Reserve, Wuwei, Gansu 733000, China)

Abstract: [Objective] The effects of soil and stand factors on the distribution of soil organic carbon (SOC) were investigated at *Picea crassifolia* forests in the Qilian Mountains, aiming to deepen the understanding of soil carbon

收稿日期: 2024-04-22

修回日期: 2024-07-25

采用日期: 2024-07-31

资助项目: 甘肃省陇原青年创新创业人才(个人)项目“开发祁连山国家公园生态旅游资源在乡村振兴中的作用研究”(2023LQGR12); 甘肃省科技计划项目“祁连山森林草原土壤质量分析评价”(22JR11RA310)

第一作者: 冯金元(1985—), 男(汉族), 甘肃省武威市人, 本科, 高级工程师, 主要从事林业生态环境保护方面的研究。Email: 275414761@qq.com。

通信作者: 蒋志成(1979—), 男(土族), 甘肃省武威市人, 本科, 正高级工程师, 主要从事林业生态环境保护方面的研究。Email: 403666957@qq.com。

cycling mechanisms in the region and provide a scientific basis for maintaining regional carbon balance. [Methods] In July 2021, sample plots were set up at 2 700 m, 2 900 m, 3 100 m, and 3 300 m along the elevation gradients, and soil and stand data were collected. The differences in soil organic carbon in different soil layers were analyzed using non-parametric tests. Pearson correlation and linear fitting were used to examine the relationship between soil organic carbon and soil pH value, bulk density, mass moisture content, soil temperature, canopy closure, and stand density. Permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA) was used to identify factors influencing SOC variability. [Results] ① The highest average SOC content was found at 2 700 m elevation, ranging from 90.12 to 127.63 g/kg. Meanwhile, the lowest average SOC content was observed at 3 100 m elevation, ranging from 62.17 to 70.50 g/kg. The 10 cm soil layer had the highest SOC content, ranging from 70.50 to 127.63 g/kg. Meanwhile, the 40 cm soil layer had the lowest SOC content, ranging from 62.17 to 90.12 g/kg. ② SOC in all soil layers showed a significant negative correlation with pH value and bulk density ($p < 0.05$), a significant positive correlation with temperature, canopy closure, and stand density ($p < 0.05$), and a non-significant negative correlation with mass water content ($p > 0.05$). Linear regression indicated that bulk density had the strongest relationship with SOC, with a coefficient of determination (R^2) of 0.81 ($p < 0.01$), followed by pH value ($R^2 = 0.57$, $p < 0.01$) and temperature ($R^2 = 0.32$, $p < 0.01$). ③ As soil depth increased, the influence of pH value on SOC variability gradually increased. Meanwhile, the influence of bulk density decreased, and the impact of stand density gradually increased. [Conclusion] The SOC content in different soil layers showed a trend of first decreasing and then increasing with elevation. The surface soil layer showed the largest variation in SOC content, whereas the deeper soil layers showed the least variation. Correlations between SOC and soil and stand factors were ranked as follows: bulk density > pH value > temperature > stand density > canopy closure > mass moisture content. pH value was the primary factor contributing to differences in SOC across elevations.

Keywords: soil organic carbon; soil factors; soil depth; Qilian Mountains

森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,其土壤有机碳储量占到全球碳库的2/3以上,是陆地生物碳库的3倍、大气碳库的2倍^[1],其中森林土壤碳库约占全球土壤有机碳库的70%以上,即使微小的变化也会引起大气二氧化碳浓度的改变,造成全球气候波动^[2]。因此,在当前“双碳”背景下,深入研究森林土壤有机碳分布特征和影响因素作用机制对维持碳循环和碳平衡具有重要意义。目前,国内外学者在这方面已经开展了大量研究,主要从土壤因素、植物因素、气候因素、地形因素等方面来阐明土壤有机碳的分布特征及影响因素。如Chow等^[3]认为,土壤微生物的数量受控于土壤含水量,当土壤含水量过高时会限制微生物的数量,进而增强了残余微生物的活性,促进土壤有机碳的矿化。赵青等^[4]的研究表明土壤因子和林分密度等条件对土壤有机碳的影响要远大于植物群落结构特征对土壤有机碳的影响,海拔的不同会影响土壤有机碳的转换进而直接影响土壤有机碳的分布。Guo等^[5]对美国本土研究发现土壤有机碳含量随海拔增加而减少,而程浩等^[6]对武夷山研究发现土壤有机碳含量随海拔增加而增加。由此可见,不同的区域不同的植被类型,即使是同一植被类型土壤有机碳含量随海拔梯度的变

化具有各自的变化规律和不同的影响因素。

祁连山地处中国生态脆弱带,自然条件复杂,水热条件差异明显^[7],其森林土壤碳储量具有很大的空间异质性,碳循环过程抗干扰能力也更加脆弱,如果碳平衡被打破,将难以恢复,这对高寒山地的森林系统将造成极大的影响^[8]。不少学者对祁连山高寒山地的碳平衡、碳循环等方面已有许多研究。如曾立雄等^[9]的研究发现随着土层深度的增加,土壤环境条件与土壤微生物活性在逐渐降低,进而影响不同土层土壤有机碳含量。马剑等^[10]对祁连山土壤有机碳研究中发现,土壤有机碳呈现明显的“表聚性”,主要存储在0—40 cm土层,并且随着土层深度增加呈现为先增后减的趋势。朱猛等^[11]对祁连山草地土壤有机碳特征研究中发现,地形通过改变植被格局和水热条件影响凋落物输入与土壤有机质的分解,间接影响土壤有机碳的积累。虽然对祁连山土壤有机碳的研究已有很多,但侧重点各有不同^[12-14],而且较少关注对土壤有机碳含量影响较大的土壤和林分因子,以及这些因子对高寒山地森林土壤有机碳的影响程度如何。因此,本研究选择分布在祁连山大野口流域不同海拔的青海云杉(*Picea crassifolia*)林土壤为研究对象,分析青海云杉林不同土层土壤有机

碳随海拔变化形成的差异特征,分析土壤有机碳与土壤pH值、容重、温度、质量含水率、林分郁闭度和林分密度之间的相关关系,进而分析土壤及林分因子对不同海拔土壤有机碳的影响程度。研究成果有助于进一步了解土壤有机碳对环境变化的响应机制,对维持地区土壤碳平衡具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山北麓中段祁连山国家公园内的大野口流域,地理坐标为 $100^{\circ}17'0''$ — $100^{\circ}18'30''$ E, $38^{\circ}32'0''$ — $38^{\circ}33'30''$ N,流域面积约 73.32 km^2 ,海拔 $2\ 590\sim 4\ 645\text{ m}$ ^[15],年均温度 $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,日、年平均日较差高于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期约 100 d ,年均降水量约 416 mm ,主要集中在5—9月,年潜在蒸发量 $1\ 011.3\text{ mm}$,年日照时间 $1\ 562.6\text{ h}$,年均相对湿度为 60% ^[16]。流域属于典型的大陆性高寒山地气候,地形复杂,海拔高差较大,植被和土壤类型沿海拔呈明显的垂直分布,植被以建群树种青海云杉为主,为纯林,占乔木林的

69.67% ^[17],土壤类型为山地灰褐土,腐殖质积累与淋溶作用较强,无灰化和黏化现象,肥力较高^[18]。

1.2 样品采集

于2021年7—8月,在祁连山大野口流域选择青海云杉林设置样地,海拔梯度间隔为 200 m ,每个海拔段设置6个重复样地,样地规格为 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$,将每个样地分成16个 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的小样方,进行每木检尺,测定每个小样方内胸径大于等于 1 cm 所有单株的胸径、树高和冠幅。采用随机抽样法在每个样地中选取3个小样方,于小样方中心使用鱼镜头测定郁闭度。在每个样方的左上角、中心、右下角挖取 0.4 m (深) $\times 1.0\text{ m}$ (长) $\times 0.5\text{ m}$ (宽)的土坑,并在去除表面枯落物后,在距地面深 $10, 20, 30$ 和 40 cm 处取土壤剖面样品,使用容积为 100 cm^3 的环刀重复取土3次,再将一个样方同一土层的土壤均匀混合,土壤温度和土壤水分通过Campbell cr310自动记录仪采集,土壤容重采用环刀法测定,土壤pH值采用浸提电极法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾法测定^[19]。样地情况详见表1。

表1 试验样地基本情况

Table 1 Basic information of test plots

海拔高度/m	地理坐标	土层深度/cm	pH值	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	质量含水率/%	土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$	郁闭度/%	林分密度/ (株 $\cdot\text{hm}^{-2}$)
2 700	$100^{\circ}17'05.1''\text{E}$ $38^{\circ}33'13.5''\text{N}$	10	7.18 ± 0.41^a	0.44 ± 0.10^a	38.06 ± 12.128^{ab}	8.83 ± 0.05^a	0.63 ± 0.08^A	$7\ 156\pm 5\ 704^A$
		20	7.32 ± 0.44^a	0.45 ± 0.11^a	40.30 ± 11.959^a	8.38 ± 0.02^a		
		30	7.42 ± 0.41^a	0.49 ± 0.10^a	39.82 ± 11.57^b	6.88 ± 0.02^b		
		40	7.47 ± 0.40^a	0.49 ± 0.10^a	39.68 ± 11.63^b	5.81 ± 0.00^c		
2 900	$100^{\circ}18'04.1''\text{E}$ $38^{\circ}32'36.3''\text{N}$	10	7.50 ± 0.35^a	0.62 ± 0.12^a	48.56 ± 17.96^a	7.58 ± 0.03^a	0.65 ± 0.10^A	$6\ 956\pm 4\ 888^A$
		20	7.60 ± 0.41^a	0.63 ± 0.12^a	48.78 ± 19.04^a	6.75 ± 0.03^{ab}		
		30	7.63 ± 0.39^a	0.61 ± 0.14^a	49.08 ± 19.28^a	5.84 ± 0.02^b		
		40	7.66 ± 0.40^a	0.63 ± 0.14^a	49.33 ± 19.33^a	4.48 ± 0.00^c		
3 100	$100^{\circ}18'12.7''\text{E}$ $38^{\circ}32'20.0''\text{N}$	10	7.78 ± 0.27^a	0.74 ± 0.09^a	55.51 ± 17.82^{ab}	5.49 ± 0.02^a	0.53 ± 0.08^B	$4\ 711\pm 2\ 361^B$
		20	7.92 ± 0.32^a	0.77 ± 0.11^a	61.49 ± 17.45^a	3.91 ± 0.01^b		
		30	7.96 ± 0.33^a	0.82 ± 0.13^{ab}	58.91 ± 17.27^b	2.82 ± 0.01^c		
		40	7.99 ± 0.33^a	0.85 ± 0.14^{ab}	59.34 ± 17.58^b	1.60 ± 0.00^d		
3 300	$100^{\circ}18'15.1''\text{E}$ $38^{\circ}32'08.3''\text{N}$	10	7.32 ± 0.30^a	0.52 ± 0.17^a	63.04 ± 14.81^{ab}	6.27 ± 0.02^a	0.40 ± 0.07^C	$4\ 378\pm 2\ 089^B$
		20	7.52 ± 0.35^a	0.54 ± 0.18^a	63.90 ± 16.31^{ab}	6.06 ± 0.03^a		
		30	7.53 ± 0.33^a	0.66 ± 0.20^{ab}	65.59 ± 16.09^a	4.53 ± 0.02^b		
		40	7.58 ± 0.33^a	0.67 ± 0.22^{ab}	66.21 ± 15.92^a	3.51 ± 0.0^c		

注:小写字母表示同一海拔不同土层的差异显著性($p<0.05$),大写字母表示不同海拔植被特征的差异显著性($p<0.05$)。

1.3 数据处理

土壤有机碳含量数据的正态性采用Shapiro-Wilk法检验^[20],各层土壤有机碳在海拔间的差异性采用非参数检验法Kruskal-Wallis法分析,多重比较采用Dunn's检验法检验。各层土壤有机碳与土壤及林分因子使用Pearson相关性分析,再进行线性拟

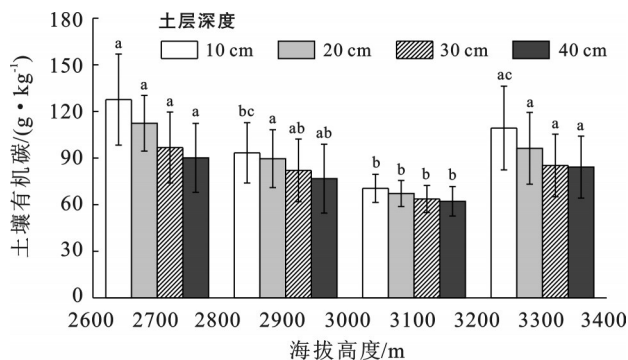
合。使用置换多因素方差分析,分析土壤及林分因子对不同海拔各层土壤有机碳差异的影响。

2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤有机碳分布特征

祁连山中段青海云杉林土壤有机碳分布特征如

图 1 所示。所有土层的土壤有机碳含量随海拔增加均呈现出先减后增的趋势,海拔 2 700 m 土壤有机碳含量平均最高,为 90.12~127.63 g/kg;海拔 3 100 m 土壤有机碳含量平均最低,为 62.17~70.50 g/kg。各海拔土壤有机碳含量随土层深度增加呈逐渐减小趋势,其变化幅度也随着土层深度的增加逐渐平缓,10 cm 土层土壤有机碳含量最高,为 70.50~127.63 g/kg,各海拔间变化幅度最大;40 cm 土层土壤有机碳含量最低,为 62.17~90.12 g/kg,各海拔间变化幅度最小。非参数检验结果显示,海拔 2 700 m 与海拔 3 100 m 的土壤有机碳在不同土层都存在显著差异,随着土层深度增加,不同海拔土壤有机碳含量差异性在逐渐减小。



注:不同小写字母表示差异显著性($p < 0.05$)。

图 1 不同土层土壤有机碳随海拔高度分布的特征

Fig.1 Characteristics of soil organic carbon distribution with altitude in different soil layers

2.2 土壤有机碳与土壤及林分因子之间的关系

青海云杉林不同土层土壤有机碳与土壤及林分因子相关关系详见表 2。10 cm 土层土壤有机碳与 pH 值、容重呈显著负相关,相关系数分别为 -0.67 和 -0.91,与温度、郁闭度、林分密度呈现显著正相关,相关系数分别为 0.53, 0.21, 0.45。20 cm 土层土壤有机碳与 pH 值、容重呈现显著负相关,相关系数分别为 -0.76 和 -0.92,与温度、郁闭度、林分密度呈现显著正相关,相关系数分别为 0.65, 0.30, 0.62。30 cm 土层土壤有机碳与 pH 值、容重呈现显著负相关,相关系数分别为 -0.72 和 -0.79,与温度、郁闭度、林分密度呈现显著正相关,相关系数分别为 0.49, 0.30, 0.65。40 cm 土层土壤有机碳与 pH 值、容重呈现显著负相关,相关系数为 -0.70 和 -0.74,与温度、郁闭度、林分密度呈现显著正相关,相关系数分别为 0.42, 0.32, 0.64。

土壤有机碳与土壤及林分因子的线性回归分析结果如图 2 所示。土壤有机碳与容重的线性拟合关系最好,决定系数为 0.81($p < 0.01$),其次是 pH 值和

土壤温度,决定系数分别为 0.57($p < 0.01$)和 0.32($p < 0.01$),土壤有机碳与土壤质量含水率线性拟合关系最差,决定系数为 0.00($p > 0.05$),表明容重大小对土壤有机碳含量影响比土壤 pH 值和温度大,而土壤质量含水率对土壤有机碳含量几乎没有影响。尽管郁闭度和林分密度与土壤有机碳存在较明显的相关关系,但线性拟合关系均不显著($p > 0.05$)。

表 2 土壤及林分因子与土壤有机碳的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of soil and stand factors with soil organic carbon

因子	不同土层深度处相关系数			
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
pH 值	-0.67*	-0.76*	-0.72*	-0.70*
容重	-0.91*	-0.92*	-0.79*	-0.74*
质量含水率	-0.12	-0.18	-0.10	-0.03
温度	0.53*	0.65*	0.49*	0.42*
郁闭度	0.21*	0.30*	0.30*	0.32*
林分密度	0.45*	0.62*	0.65*	0.64*

注:*表示在 $p < 0.05$ 水平显著相关。下同。

2.3 土壤及林分因子对不同海拔土壤有机碳差异的影响

各层土壤有机碳与土壤及林分因子之间的差异性分析结果如表 3 所示。由表 3 可知,10 cm 土层土壤有机碳在海拔间形成的差异与土壤 pH 值和容重有关,决定系数分别为 0.44 和 0.40,其中 pH 值和容重是造成 10 cm 土层土壤有机碳差异的主要因素,容重影响较小;20 cm 土层土壤有机碳在海拔间形成的差异与 pH 值、容重和林分密度有关,决定系数分别为 0.46, 0.29 和 0.01,其中 pH 值是造成 20 cm 土层土壤有机碳差异的主要因素,容重的影响有所下降,林分密度影响较小,影响有所上升;30 和 40 cm 土层土壤有机碳在海拔间形成的差异与 pH 值、容重和林分密度有关,决定系数分别为 0.50, 0.20, 0.03, 0.56, 0.16 和 0.05,其中 pH 值仍是造成 30 和 40 cm 土层土壤有机碳差异的主要因素,容重的影响有所下降,林分密度影响最小。

3 讨论

3.1 不同海拔高度土壤有机碳分布特征

本研究结果表明,各土层土壤有机碳随海拔高度呈现为先降后升的变化趋势,表层土壤有机碳变化幅度最大,深层土壤有机碳变化幅度最小,表明输入表层土壤的有机质较多,在较为复杂的外界环境作用下变化幅度较大;输入深层土壤的有机质较少,外界环境的影响因子也随之减少,因此变化幅度较

小。各海拔土壤有机碳表现为随土层深度增加而减少,最大值出现在海拔 2 700 m,最小值出现在海拔 3 100 m,这可能与海拔梯度选取有关。分析认为,土壤有机碳的固存释放与植物输入土壤的有机质类型和数量、微生物数量、土壤水热等条件密切相关^[21],不同海拔易形成差异性较大的植被类型和生物量^[22]。海拔

2 700 m 水热条件较好,有利于林下灌草等植物生长,植被输入土壤的有机质丰富,微生物活性较高,因此土壤有机碳输入多转化快。随着海拔升高,土壤温度逐渐降低,降雨量增加,林下灌草等植物种间竞争加剧,输入土壤的有机质逐渐减少,在海拔 3 100 m 土壤有机碳输入少、转化快,形成了较低含量的土壤有机碳。

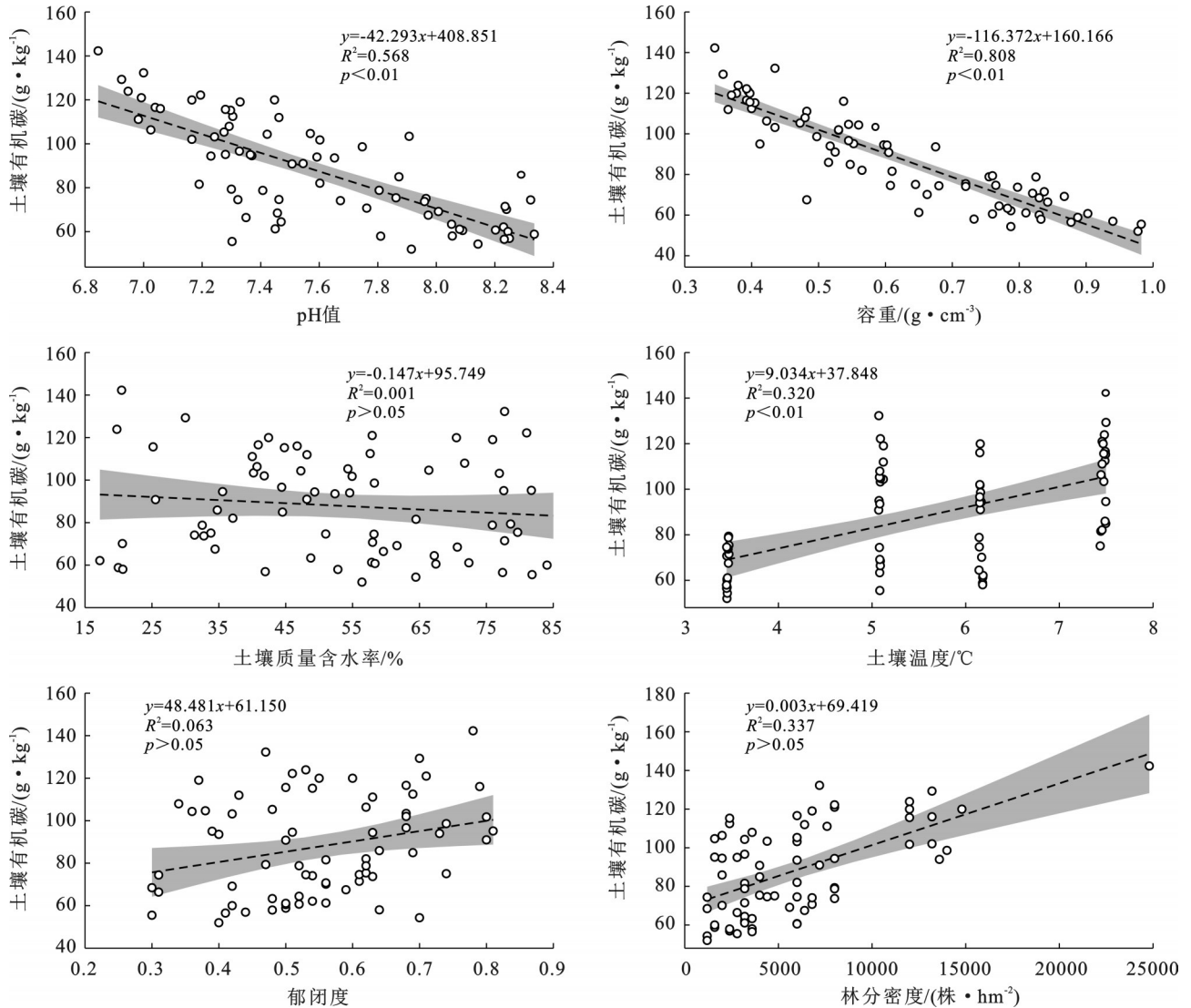


图 2 土壤有机碳与土壤及林分因子的线性拟合

Fig.2 Linear fitting of soil organic carbon to soil and stand factors

表 3 土壤及林分因子对土壤有机碳差异的影响

Table 3 Effects of soil and stand factors on soil organic carbon variation

因子	不同深度处决定系数			
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
pH 值	0.44*	0.46*	0.50*	0.56*
容重	0.40*	0.29*	0.20*	0.16*
质量含水率	0.00	0.00	0.00	0.01
温度	0.01	0.01	0.00	0.00
郁闭度	0.00	0.01	0.00	0.00
林分密度	0.00	0.01*	0.03*	0.05*

3.2 土壤因子与林分因子对土壤有机碳的影响

本研究表明,土壤 pH 值、容重、温度与土壤有机碳的相关关系随土层深度增加表现出先升后降趋势,林分密度和郁闭度表现为随土层深度增加与深层土壤有机碳有较强相关性。线性拟合结果表明影响土壤有机碳的土壤及林分因子作用表现为:容重 > pH 值 > 温度 > 林分密度 > 郁闭度 > 质量含水率,林分密度、郁闭度和质量含水率的相关性作用不显著。分析认为,土壤表层凋落物丰富,是动植物生长活动的主要场所,较小的土壤容重具有良好的通气

性,有利于土壤微生物分解土壤有机质^[23],随着土层深度的增加,土壤孔隙度减小,向下输入有机质的过程受到制约^[24],同时土壤通气性也变差,使土壤微生物在分解有机质过程中因二氧化碳浓度升高氧气含量降低从而降低了微生物活性^[25]。土壤pH值主要通过影响矿质元素的溶解与迁移,影响微生物生存环境以及参与有机碳循环的酶活性从而制约土壤有机碳含量^[26]。土壤温度仅影响表层土壤有机碳,可能是因为光照提升了表层土壤温度,有利于提高表层土壤微生物的分解效率,而深层土壤由于常年处于较低温度,变化幅度也较低,对深层土壤影响较小。

土壤pH值、容重是形成所有土层土壤有机碳差异的主要影响因子,林分密度次之。同时,随着土层深度增加,在各因子对土壤有机碳差异的影响中pH值的比例在逐渐增加,容重的影响在逐渐减小,表明容重虽然与土壤有机碳密切相关,但pH值才是土壤有机碳在海拔间形成差异的主要影响因子。分析认为,土壤有机碳固存与释放的主要参与者是土壤微生物和土壤酶^[27],土壤pH值和容重都会影响土壤微生物的活性,但其影响作用和途径有所差异,容重主要通过影响通气透水性间接影响土壤微生物活性,而pH值的改变对土壤微生物和土壤酶参与有机碳循环过程的影响更为直接和敏感。林分密度主要从输入土壤有机质的种类和质量方面影响土壤有机碳的分布和特征,深层土壤在水热条件稳定的基础上才进一步显现出林分密度的微弱影响,由于青海云杉林分结构单一,林下其他灌草植被分布稀疏,因此对土壤有机碳的差异影响较小。

4 结论

祁连山青海云杉林40 cm土层土壤有机碳随海拔增加均呈现为先降后升的趋势,海拔高度2 700 m土壤有机碳含量平均最高,海拔高度3 100 m土壤有机碳含量平均最低。土壤有机碳在不同土层都存在显著差异,随着土层深度增加,不同海拔高度土壤有机碳含量差异性在逐渐减小。土壤有机碳与土壤及林分因子相关关系表现为:容重>pH值>温度>林分密度>郁闭度>质量含水率,土壤容重、pH值和温度与土壤有机碳呈极显著相关($p<0.01$),其他因子的相关性不显著($p>0.05$)。pH值是形成海拔间土壤有机碳差异的主要影响因子,容重的影响有所下降,林分密度影响最小。

参考文献(References)

[1] Deng Lei, Wang Kaibo, Chen Meiling, et al. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest

succession on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2013,110:1-7.

[2] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994,263(5144):185-190.

[3] Chow A T, Tanji K K, Gao Suduan, et al. Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006,38(3):477-488.

[4] 赵青,刘爽,陈凯,等.武夷山自然保护区不同海拔甜槠天然林土壤有机碳变化特征及影响因素[J].生态学报,2021,41(13):5328-5339.

Zhao Qing, Liu Shuang, Chen Kai, et al. Change characteristics and influencing factors of soil organic carbon in *Castanopsis eyrei* natural forests at different altitudes in Wuyishan Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(13):5328-5339.

[5] Guo Yinyan, Gong Peng, Amundson R, et al. Analysis of factors controlling soil carbon in the conterminous United States [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006,70(2):601-612.

[6] 程浩,张厚喜,黄智军,等.武夷山不同海拔高度土壤有机碳含量变化特征[J].森林与环境学报,2018,38(2):135-141.

Cheng Hao, Zhang Houxi, Huang Zhijun, et al. Variations of soil organic carbon content along an altitudinal gradient in Wuyi Mountain [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2018,38(2):135-141.

[7] 孙武,侯玉,张勃.生态脆弱带波动性、人口压力、脆弱度之间的关系[J].生态学报,2000,20(3):369-373.

Sun Wu, Hou Yu, Zhang Bo. An approach to the fluctuation relation among land productivity, population pressure and weakness in ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000,20(3):369-373.

[8] 芦倩,李毅,刘贤德,等.祁连山排露沟流域土壤有机碳空间变异性研究[J].水土保持学报,2020,34(5):238-243.

Lu Qian, Li Yi, Liu Xiande, et al. Study on spatial variability of soil organic carbon in pailugou catchment of Qilian Mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(5):238-243.

[9] 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 Lixiong, Lei Lei, Wang Xiaorong, 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.

[10] 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 Jian, Jin Ming, Jing Wenmao, 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.
- [11] 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 Meng, Feng Qi, Zhang Mengxu, 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.
- [12] 穆少杰,周可新,陈奕兆,等.草地生态系统碳循环及其影响因素研究进展[J].草地学报,2014,22(3):439-447.
- Mu Shaojie, Zhou Kexin, Chen Yizhao, et al. Research progress on the carbon cycle and impact factors of grassland ecosystem [J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(3):439-447.
- [13] 薛志婧,屈婷婷,刘春晖,等.培养条件下枯落物分解过程中微生物残体对土壤有机碳形成的贡献[J].应用生态学报,2023,34(7):1845-1852.
- Xue Zhijing, Qu Tingting, Liu Chunhui, et al. Contribution of microbial necromass to soil organic carbon formation during litter decomposition under incubation conditions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(7):1845-1852.
- [14] 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 Weijun, Liu Xiande, Zhang Xuelong, et al. Relationship between soil organic carbon content and chemical properties of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6):1565-1571.
- [15] 张彦丽,李丑荣,王秀琴,等.基于WorldView-2制备大野口流域高分辨率DEM及精度分析[J].遥感技术与应用,2013,28(3):431-436.
- Zhang Yanli, Li Chourong, Wang Xiuqin, et al. Preparation of high-resolution DEM in Dayekou Basin based on the WorldView-2 and its accuracy analysis [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(3):431-436.
- [16] 李效雄,刘贤德,赵维俊.祁连山大野口流域青海云杉种群结构和空间分布格局[J].干旱区地理,2012,35(6):960-967.
- Li Xiaoxiong, Liu Xiande, Zhao Weijun. Population structure and spatial distribution pattern of *Picea crassifolia* in Dayekou Basin of Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2012, 35(6):960-967.
- [17] 马剑,刘贤德,金铭,等.祁连山青海云杉林土壤理化性质和酶活性海拔分布特征[J].水土保持学报,2019,33(2):207-213.
- Ma Jian, Liu Xiande, Jin Ming, et al. Soil physico-chemical properties and enzyme activities along the altitudinal gradients in *Picea crassifolia* of Qilian Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2):207-213.
- [18] 秦燕燕,冯起,朱猛,等.坡向对祁连山大野口流域草地植物叶片N、P化学计量的影响[J].兰州大学学报(自然科学版),2017,53(3):362-367.
- Qin Yanyan, Feng Qi, Zhu Meng, et al. Influence of slope aspect on ecological stoichiometry of grassland plant leaves in Dayekou Basin of Qilian Mountains [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2017, 53(3):362-367.
- [19] 张媛媛,王晓锋,王轶浩,等.三峡消落带不同坡度狗牙根及实生土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2023,43(11):4798-4811.
- Zhang Yuanyuan, Wang Xiaofeng, Wang Yihao, et al. Ecological stoichiometry and interrelation of *Cynodon dactylon* and soil in the Three Gorges hydro-fluctuation zone under different slopes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11):4798-4811.
- [20] Hanusz Z, Tarasińska J. Normalization of the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests of normality [J]. Biometrical Letters, 2015, 52(2):85-93.
- [21] Zhu Biao, Wang Xiangping, Fang Jingyun, et al. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China [J]. Journal of Plant Research, 2010, 123(4):439-452.
- [22] 彭守璋,赵传燕,郑祥霖,等.祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征[J].应用生态学报,2011,22(7):1689-1694.
- Peng Shouzhong, Zhao Chuanyan, Zheng Xianglin, et al. Spatial distribution characteristics of the biomass and carbon storage of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forests in Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7):1689-1694.
- [23] 丛高,张志丹,张晋京,等.长白山不同林型土壤有机碳特征[J].水土保持学报,2019,33(3):179-184.
- Cong Gao, Zhang Zhidan, Zhang Jinjing, et al. Research on characteristics of soil organic carbon in different forest types in Changbai Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3):179-184.
- [24] 张厚喜,林丛,程浩,等.武夷山不同海拔梯度毛竹林土壤有机碳特征及影响因素[J].土壤,2019,51(4):821-828.
- Zhang Houxi, Lin Cong, Cheng Hao, et al. Variation of soil organic carbon content of Moso bamboo forest along altitudinal gradient in Wuyi Mountain in China [J]. Soils, 2019, 51(4):821-828.