

宁夏罗山典型植被类型土壤有机碳分布特征*

徐志鹏 李帆 丁万全 曹晔 杨健

(宁夏回族自治区林业调查规划院, 宁夏回族自治区 银川 750005)

摘要 为探究宁夏罗山不同植被类型土壤有机碳分布特征, 以罗山国家级自然保护区分布的4种典型植被类型包括草地、灌丛、油松 *Pinus tabulaeformis* 和青海云杉 *Picea crassifolia* 土壤为研究对象, 分析不同植被类型土壤剖面有机碳含量及碳储量的分布规律。结果表明, (1) 不同植被类型土壤有机碳含量及储量随土层深度的增加呈逐渐减少的趋势, 土壤有机碳含量和碳储量由大到小表现为油松、青海云杉、灌丛、草地, 且差异极显著 ($P < 0.01$)。该研究结果证实在干旱半干旱区山地森林生态系统土壤有机碳含量和储量在海拔梯度下符合“中部膨胀”理论假设。(2) 土壤水溶性有机碳含量随土层深度的增加而降低, 变化范围为 $340.8 \sim 540.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以油松最高。土壤水溶性有机碳分配比例以草地最高, 随着土层深度的增加而逐渐升高。(3) 青海云杉土壤有机碳含量与全盐、电导率呈显著正相关, 其余植被类型的土壤有机碳含量与pH值呈现显著负相关, 但土壤水溶性有机碳含量与各土壤理化因子均无显著相关性。因此, 在干旱半干旱地区实施退耕还林还草和禁牧政策, 并根据不同植被类型改善土壤的营养供应水平, 有利于提高林草生态系统土壤的碳封存潜力。

关键词 土壤有机碳; 分布特征; 水溶性有机碳; 植被类型; 宁夏罗山

中图分类号: S714.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2025) 02-0077-09

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202502011

Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Across the Different Typical Vegetation Types in Luoshan, Ningxia

XU Zhipeng LI Fan DING Wanquan CAO Ye YANG Jian

(Ningxia Hui Autonomous Region Forestry Investigation and Planning Institute, Yinchuan, Ningxia Hui Autonomous Region 750005, China)

Abstract To investigate the distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) under different vegetation types in Luoshan National Nature Reserve of Ningxia, four typical vegetation types, grassland (CD), shrub (GC), *Pinus tabulaeformis* forest (YS), and *Picea crassifolia* forest (QH), were selected as research subjects to analyze the distribution patterns of soil organic carbon content and carbon storage across soil profiles. The results showed that the SOC content and organic carbon storage decreased with increasing soil depth across all vegetation types, with the order $YS > QH > GC > CD$, showing extremely significant differences ($P < 0.01$). This study confirms that the soil organic carbon content and storage in mountain forest ecosystems of arid and semi-arid regions conform to the "central expansion" hypothesis along the elevational gradient. The soil dissolved organic carbon (DOC) content decreased with soil depth ($340.8 \sim 540.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), being the highest

* 第一作者/通信作者: 徐志鹏 (1980—), 女, 高级工程师, 主要从事生态系统碳汇、野生动植物资源环境研究。E-mail: 463459426@qq.com

YS. The distribution ratio of soil DOC was highest in the CD and increased with increasing soil depth. The SOC content of *P. crassifolia* forest showed significant positive correlations with total salt and electrical conductivity, while other vegetation types exhibited a significant negative correlation between SOC and pH. No significant correlations were found between DOC and physical and chemical indices. Therefore, implementing policies such as returning farmland to forests and grasslands and banning grazing in semi-arid areas, and improving soil nutrient supply levels according to different vegetation types, is beneficial for enhancing the carbon sequestration potential of soil in forest and grassland ecosystems.

Key words soil organic carbon; distribution characteristics; dissolved organic carbon; vegetation types; Luoshan, Ningxia

土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 是土壤碳库的重要组成部分, 在全球碳循环中扮演着重要角色^[1]。全球 SOC 储量 2 500 Gt, 是大气碳库和生物碳库的 3~4 倍^[2], 任何 SOC 储量的细微变化都可能会影响全球陆地生态系统碳循环。根据 SOC 稳定性和分解速率差异可将 SOC 分为惰性有机碳、缓效性有机碳和活性有机碳^[3]。土壤有机碳各组分间能够相互转化, 不同组分间又共同调控土壤碳库平衡、碳循环过程, 影响和指示森林土壤质量^[4]。土壤活性有机碳组分比 SOC 更敏感^[5], 虽然土壤活性有机碳在 SOC 中占比很小, 但是其在土壤碳循环中起着极为重要的作用, 可作为 SOC 含量变化的指示物, 土壤活性有机碳组分占 SOC 的比例可在一定程度上反映 SOC 的质量和稳定性^[6]。可溶性有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC) 是重要的可移动碳源, 而且是维持微生物活动的重要能量来源, 可以被微生物直接利用^[7], 对土壤碳素的生物地球化学循环有很大影响。因此, 厘清不同土壤有机碳活性组分分布积累的影响及其内在机制, 对于准确评估土壤质量及碳库动态变化具有重要意义。

土壤活性有机碳主要由林分中鲜有机质与腐殖质间的过渡性物质分解而成, 林分结构、土壤理化性质以及微环境的变化均会对土壤有机碳的空间变异产生影响, 增加它的不稳定性, 从而快速表征土壤的碳库变化。森林生态系统复杂性高, 不同森林类型及同一类型中的不同树种组成、不同演替阶段的土壤有机碳及其活性组分特征亦有明显差异, 同时也存在同一林分土壤有机碳随土层深度增加有效性降低的规律^[8]。马继龙等^[9] 研究结果显示, 旱生和周期性水淹生境 SOC 及活性组分含量在 0~20 cm 土层维持着较高水平, 中生境则在 20~40 cm 土层保持着较高的 SOC 活性

组分分配比例, 其土壤微生物活性最高, SOC 转化速率较高。王军广等^[10] 研究结果显示, 不同土壤易氧化有机碳含量与海拔呈现极显著或显著正相关, 表层 (0~10 cm) 土壤易氧化有机碳含量与土壤 pH 呈极显著负相关, 与坡度呈显著负相关; 土壤易氧化有机碳与机械组成 (黏粒、粉粒、砂粒) 均未达到显著水平。胡澳等^[11] 研究结果显示, 中度采伐对马尾松 *Pinus massoniana* 次生林土壤有机碳及其活性组分具有更显著的促进作用, 随自然恢复时间越长越有利于土壤活性有机碳组分质量分数增加, 适度采伐马尾松纯林并让其自然恢复可促进土壤碳库积累。以上研究结果表明不同研究团队在不同地区得到的研究结果差异较大, 亟需针对特定区域开展有机碳含量及储量研究。西北干旱半干旱区的山地生态系统脆弱, 水土流失严重, 因此开展不同海拔 SOC 及其活性组分的分布规律研究, 对了解旱区山地森林土壤固碳过程和维持土壤碳平衡具有重要意义。

宁夏罗山自然保护区地处鄂尔多斯高原西部与黄河高原北部的干旱半干旱地带, 是宁夏中部的绿色生态屏障, 也是宁夏中部重要的水源涵养林区, 是以青海云杉 *Picea crassifolia* 和油松 *P. tabulaeformis* 为代表的典型荒漠森林生态系统, 植被分布具有典型的垂直梯度, 素有“荒漠翡翠”之称^[12]。本研究以宁夏罗山自然保护区 4 种典型植被类型为研究对象, 通过研究土壤有机碳在不同植被类型和不同土层的分布特征, 并分析其与主要土壤理化性质的相关性, 可为进一步精确估算宁夏干旱半干旱区的山地森林土壤碳库提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏罗山国家级自然保护区位于 37° 11' ~

37°25'N, 106°04'~106°24'E, 南北长 36 km, 东西宽 18 km, 海拔 1 560.0~2 624.5 m, 总面积 33 710 hm²[12]。该地属于温带干旱大陆性气候, 年平均气温为 8.8 °C, 昼夜温差为 10.2 °C, 最低温度为 -27.1 °C; 太阳辐射强, 全年平均日照为 2 881.5 h;

降雨少且较为集中, 年均降雨量为 261.8 mm, 年均蒸发量为 2 460 mm, 是降雨量的 9.5 倍[13]; 山地植被沿海拔梯度呈明显的垂直分布。本研究沿海拔梯度从低到高选取草地、灌丛、油松和青海云杉 4 种植被类型。样地基本信息如表 1 所示。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic situation of the sample plot

植被类型	海拔/m	经纬度	坡度/(°)	土壤类型	林下植物
青海云杉	2 555	37°18'22"N 106°16'57"E	32	山地灰褐土	华北驼绒藜 <i>Krascheninnikovia arborescens</i> 、刺旋花 <i>Convolvulus tragacanthoides</i> 、毛山楂 <i>Crataegus maximowiczii</i> 、华北紫丁香 <i>Syringa oblata</i> 等
油松	2 203	37°16'2.1"N 106°16'48"E	61	山地灰褐土	水栒子 <i>Cotoneaster multiflorus</i> 、蒙古荚蒾 <i>Viburnum mongolicum</i> 、虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i> 、小叶忍冬 <i>Lonicera microphylla</i> 、美蔷薇 <i>Rosa bella</i> 等
灌丛	2 149	37°15'51"N 106°16'32"E	26	淋溶灰褐土	水栒子、蒙古扁桃 <i>Prunus mongolica</i> 、虎榛子、黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i> 、土庄绣线菊 <i>Spiraea ouensanensis</i> 、小叶忍冬、华北驼绒藜等
草地	1 898	37°16'56"N 106°15'51"E	22	淋溶灰褐土	刺旋花、长芒草 <i>Stipa bungeana</i> 、蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i> 、达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i> 等

1.2 土壤样品的采集与处理

2022 年 8 月中旬, 对研究区进行实地勘察, 基于立地环境相似原则, 在每种植被类型分别设置 3 块 20 m×20 m 的重复样地。去除地表凋落物后, 在每块样地 4 个顶点及中心点位置五点法分层 (0~10、10~20、20~40、40~60 cm) 取样, 同一样地相同土样按层混合均匀, 共 48 份土样 (4 个植被类型×4 个土层×3 个重复)。同时用环刀分层取样, 用于测定每层的土壤容重和土壤含水量。将土样带回实验室自然风干, 磨细过筛 (孔径为 0.25 mm 和 1 mm), 用于土壤有机碳含量、水溶性有机碳含量及部分土壤基本理化性质的测定。

1.3 理化指标的测定

土壤水溶性有机碳采用蒸馏水浸提法 (水土比为 5:1) 测定, 土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定, 土壤各项理化性质采用常规分析方法测定[14], 并作 3 次重复。其中, 土壤容重采用环刀法, 土壤含水量采用烘干法, 电导率采用电极法, pH 采用电位法 (水:土=2.5:1), 全盐含量采用烘干-重量法 (水土比为 5:1) 测定。

1.4 数据分析与处理

土壤有机碳储量是指单位面积一定深度土层中土壤有机碳的总量[15], 可采用下式计算[16]。

$$C_s = S_i \times B_i \times D_i \times 0.1$$

式中, C_s 表示第 i 层土壤有机碳储量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$), S_i 表示第 i 层土壤有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), B_i 表示第 i 层土壤容重, D_i 为第 i 层土壤厚度 (cm), 0.1 为单位转换系数。

数据统计分析使用 SPSS 20.0 软件, 对不同植被类型间、不同土层间各指标进行单因素方差分析, 植被类型和土层厚度对各指标的交互作用采用双因素方差分析。用 LSD 法进行显著性多重比较, 显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。采用双变量相关分析法计算各项理化性质与有机碳组分之间的 Pearson 相关系数, 利用 Origin 9.3 作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型土壤有机碳含量分布特征

不同植被类型各土层的土壤有机碳含量分布如图 1 所示, 油松林和青海云杉林的有机碳含量保持较高水平, 各植被类型平均土壤有机碳含量大小依次为油松林 ($36.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、青海云杉 ($35.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、灌丛 ($17.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、草地 ($9.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。在垂直方向, 各植被类型不同土层间土壤有机碳含量为 $7.17 \sim 43.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 不同植被类型土壤有机碳含量均随土层的增加而逐渐降低。

同一植被类型, 不同土层的土壤有机碳含量,

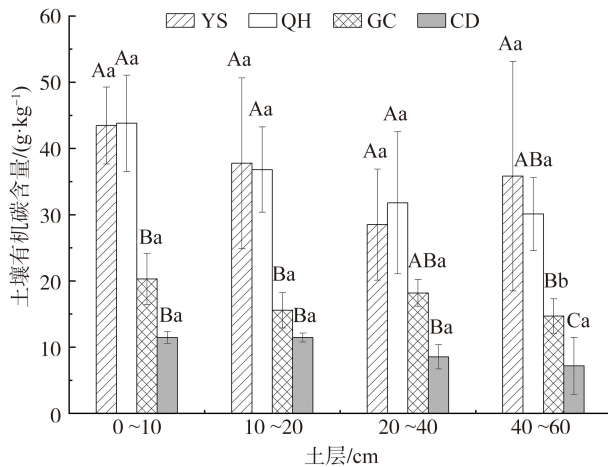
除灌丛的0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层存在显著性差异外,其他植被类型的不同土层间未表现出显著性差异,在同一土层,不同植被类型间的土壤有机碳含量存在显著性差异(图1)。油松林和青海云杉林在各土层均未表现出显著差异性,可能是两种乔木枯落叶和根系输入差异小,土壤微生物等对有机碳分解和转化能力差异不大导致。在0~10 cm,青海云杉林有机碳含

量最大,为 $43.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;草地有机碳含量最小,为 $11.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相较其他土层,各植被类型0~10 cm土层的有机碳含量占整个土壤剖面的比例最高,说明土壤有机碳的分布具有明显的表聚效应。植被类型对土壤有机碳含量的影响显著($P < 0.01$),土层厚度及植被类型和土层厚度的交互作用对土壤有机碳含量的影响未达到显著水平(表2)。

表2 植被类型和土层深度对有机碳含量和储量的互作用

Table 2 Effects of vegetation type and soil depth on organic carbon content and storage

项目	指标	植被类型	土层深度	植被类型×土层深度
有机碳含量	df	3	3	9
	F	34.116	2.826	0.542
	P	<0.01	0.057	0.831
水溶性有机碳含量	df	3	3	9
	F	19.872 05	1.855 17	2.159 905
	P	<0.01	0.157 098	0.052 913
有机碳储量	df	3	3	9
	F	20.884 95	7.672 135	0.832 181
	P	<0.01	<0.01	0.592 855



注: YS-油松; QH-青海云杉; GC-灌丛; CD-草地, 不同大写字母表示同一土层不同植被类型间显著差异, 不同小写字母表示同一植被类型不同土层间显著差异 ($P < 0.05$)。

图1 宁夏罗山不同植被类型土壤有机碳含量垂直分布特征
Figure 1 Vertical distribution characteristics of soil organic carbon in different typical vegetation types in Luoshan, Ningxia

2.2 不同植被类型土壤有机碳储量分布特征

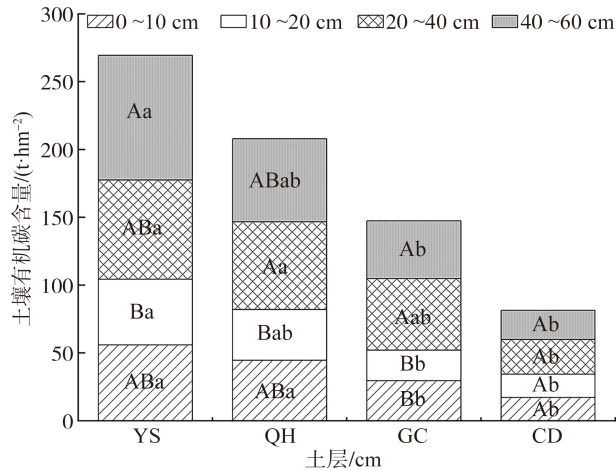
由图2可知,各植被类型0~60 cm土壤有机碳储量从大到小依次为油松林($269.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、青海云杉林($207.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、灌丛($147.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、草

地($81.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),这与土壤有机碳含量在各植被中的分布规律相同。在垂直方向,除油松的土壤有机碳储量随土层深度的增加呈现先减少后增加的趋势,其他植被类型土壤有机碳储量随着土层的增加而逐渐减少。同一植被不同土层土壤有机碳储量,除草地外,其他植被类型的不同土层间均存在显著差异($P < 0.05$);油松林与青海云杉林、灌丛与草地分别在相同土层时差异不显著。4种植被在0~20 cm土层平均有机碳储量最高,为 $68.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;20~40 cm土层的平均有机碳储量最少,为 $54.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同植被类型0~20 cm土层的有机碳储量占0~60 cm土壤有机碳储量的比例由大到小为草地(42.15%)、油松林(38.70%)、青海云杉林(39.44%)、灌丛(35.28%)。

植被类型对土壤有机碳储量的影响显著($P < 0.01$),土层厚度对土壤有机碳储量具有显著影响($P < 0.01$),而植被类型和土层厚度的交互作用对土壤有机碳储量的影响未达到显著水平(表2)。

2.3 不同植被类型水溶性有机碳含量及分配比例

各植被类型土壤平均水溶性有机碳含量大小为油松林($540.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、青海云杉



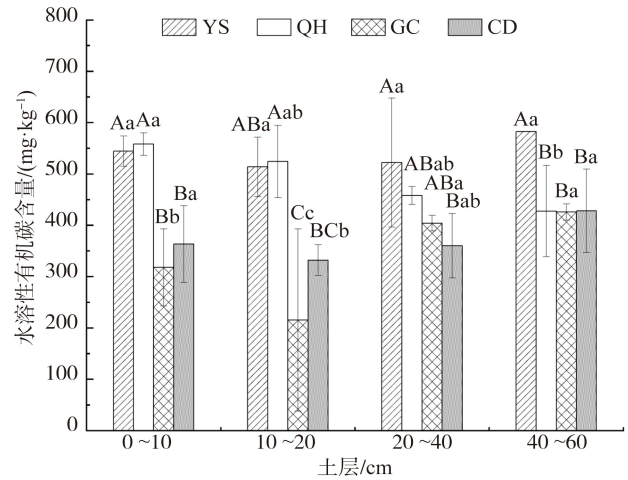
注：不同大写字母表示同一植被类型不同土层间显著差异，不同小写字母表示同一土层不同植被类型间显著差异 ($P < 0.05$)。

图2 宁夏罗山不同植被类型土壤有机碳储量垂直分布特征
Figure 2 Vertical distribution characteristics of soil organic carbon stock in different typical vegetation types in Luoshan, Ningxia

($491.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、草地 ($370.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、灌丛 ($340.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。这与不同植被类型的土壤有机碳含量的分布规律基本一致，这是由于森林土壤水溶性有机碳主要来源于枯枝落叶、根系分泌物及土壤有机碳，在特定条件下，土壤水溶性碳与土壤有机碳可以相互转化，因此土壤有机碳含量较高的土壤，通常土壤水溶性碳含量也较高^[18]。在垂直方向，土壤水溶性有机碳含量随土层深度的增加而降低，这与大部分研究结论一致^[19-20]，但其他植被类型的土壤水溶性有机碳随土层的增加呈现先减少后增加的趋势，在 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层的土壤水溶性有机碳含量均达到最高。

同一植被不同土层的土壤水溶性有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$)，整体表现为 $0 \sim 10$ 与 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层间存在显著性差异；同一土层不同植被类型间的土壤水溶性有机碳含量均具有差异性，在各土层植被间的差异性不尽相同 (图3)。油松 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层的水溶性碳含量为 $582.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，在所有土层中最高，灌丛 $10 \sim 20$ 土层的水溶性碳含量 ($215.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 在所有土层中最低。水溶性碳在各土层的分布仍然具有表聚性，各植被 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的水溶性碳含量占 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 土层的比例由大到小为青海云杉 (55%)、油松 (48.9%)、草地 (46.9%)、灌丛 (39.1%)，这与土壤有机碳含量的表层占比规律相同。植被类型对水溶性

有机碳含量的影响显著 ($P < 0.01$)，土层厚度及植被类型和土层厚度的交互作用对水溶性有机碳含量的影响均未达到显著水平 (表2)。



注：不同大写字母表示同一土层不同植被类型间显著差异，不同小写字母表示同一植被类型不同土层间显著差异 ($P < 0.05$)。

图3 宁夏罗山不同植被类型水溶性有机碳含量垂直分布特征

Figure 3 Vertical distribution characteristics of dissolved organic carbon in different typical vegetation types in Luoshan, Ningxia

表3 宁夏罗山土壤水溶性碳占总有机碳的比率 %
Table 3 Ratio of dissolved organic carbon to total organic carbon in Luoshan, Ningxia

土层深度/cm	油松林	青海云杉林	灌丛	草地
0~10	1.25	1.27	1.57	3.18
10~20	1.36	1.42	1.39	2.90
20~40	1.83	1.44	2.22	4.22
40~60	1.63	1.42	2.90	5.97
平均值	1.52	1.39	2.02	4.07

土壤活性碳库与总有机碳的比值可以反映土壤有机碳的质量^[21]。其中土壤水溶性有机碳有效率 (DOC/SOC) 反映了土壤中最活跃部分的碳占总有机碳的比例^[22]。由表3可知，不同植被 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 土层的水溶性碳所占比例的平均值大小为草地 (4.07%)、灌丛 (2.02%)、油松林 (1.52%)、青海云杉林 (1.39%)。在垂直方向，各植被不同土层土壤水溶性碳占有有机碳比例为 1.25% ~ 5.97%。灌丛和草地土壤水溶性碳占有有机碳比例随土层的增加呈上升趋势，而油松和青海云杉林的土壤水溶性碳占有有机碳比例随土层的增加呈先上升后下降的趋势。

2.4 土壤 SOC 和 DOC 与土壤理化性质的相关性分析

由表 4 可知,各植被类型的土壤有机碳和水溶性有机碳间均未表现出显著性相关;除青海云杉林的土壤有机碳与土壤 pH 的相关关系不显著外,其他植被类型青海云杉林的土壤有机碳与全盐含

量、电导率存在显著相关关系 ($P < 0.05$);灌丛的土壤有机碳与土壤含水量存在显著相关性,而其他植被类型的土壤有机碳与全盐含量、电导率、土壤含水量、土壤温度和土壤 pH 的相关性均不显著。此外,土壤水溶性碳与各土壤理化因子间的相关性均未达显著水平。

表 4 宁夏罗山各植被类型土壤有机碳、水溶性有机碳与土壤理化性质的相关系数

Table 4 Correlations between soil organic carbon, dissolved organic carbon and soil physical and chemical properties of different vegetation types in Luoshan, Ningxia

植被类型	指标	水溶性有机碳	全盐	电导率	含水量	土壤温度	pH
油松林	SOC	0.225	0.361	0.365	0.477	0.111	-0.731*
	DOC	1.000	0.371	0.372	-0.023	0.195	0.134
青海云杉林	SOC	0.220	0.739*	0.751**	-0.412	-0.101	-0.294
	DOC	1.000	0.015	0.062	-0.254	0.491	0.119
灌丛	SOC	-0.030	0.231	0.231	0.719*	0.242	-0.727*
	DOC	1.000	-0.500	0.419	0.139	0.057	0.128
草地	SOC	-0.323	0.114	0.091	-0.291	-0.563	0.907**
	DOC	1.000	-0.176	-0.157	0.158	0.252	0.701*

注: *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论与结论

不同植被类型间土壤有机碳含量存在较大差异,主要是受到成土过程中环境特点和植被类型等的影响^[17]。宁夏罗山典型植被青海云杉、油松、灌丛和草地在 0~60 cm 土层平均土壤有机碳含量依次为从大到小油松林、青海云杉、灌丛、草地。这与李研妮^[23]和鲍艳等^[24]的研究结果相似,植被类型越复杂,其土壤有机碳含量越高。这是因为土壤有机质的输入来自叶、枝、根和地上凋落物、地下细根等腐殖化过程^[25],在乔木林中,土壤有机碳主要源于地表凋落物,而在灌丛和草地中,土壤有机碳的主要来源是残根^[26]。本研究中,油松林平均土壤有机碳含量大于青海云杉林,这是由于干旱区山地生态系统中海拔植被的物种多样性与生产力符合山地生态学中的“中部膨胀”理论^[27],同时亦证实在干旱半干旱区罗山土壤有机碳含量亦符合“中部膨胀”理论。由图 1 可知,0~40 cm 土层内青海云杉林土壤有机碳含量要高于油松林,这可能是由于青海云杉林分布的海拔高于油松林,而高海拔地区能维持较低的温度与较高的湿度,有机质分解较慢,从而更有利于土壤有机碳的积累^[28-29];而 40~60 cm 土层平均土壤有机碳含量则表现为油松林大于青海云杉林,这

与程积民等^[30]的研究结果相似,这可能与水溶性有机碳的迁移有关。Kaiser K 等^[31]研究表明,水溶性有机碳是温带森林深层土壤有机碳的主要来源之一。由图 3 可知,油松林在 20~60 cm 土层的水溶性有机碳含量要高于青海云杉林,这可能是导致青海云杉在 20~60 cm 土层的土壤有机碳含量低于油松林的主要原因。

土壤有机碳含量随着土层的增加而逐渐降低,这与大多数研究结果一致^[32-34],主要是因为表层土壤是植被凋落物和动物残体、粪便积累的主要场所,因此土壤微生物将凋落物等分解转化为养分后首先对土壤表层营养物质进行补给,再随土壤水分逐步向深层土壤转移,故表现为土壤有机碳含量随土层深度增加而递减^[35]。

土壤有机碳储量的分布规律与有机碳含量相同,这与大多数研究结果相似^[36-38]。各植被类型 0~60 cm 土层总有机碳储量大小依次为油松林、青海云杉、灌丛、草地,总碳储量变化范围为 81.35~269.43 t·hm⁻²,除草地外其他植被类型的土壤有机碳储量均大于全国土壤平均碳储量(96.0 t·hm⁻²)^[39],可见罗山森林土壤在全国土壤碳库中具有重要贡献。虽然草地的总有机碳储量最小,但从各植被类型 0~20 cm 土层有机碳储量占 0~60 cm 土层总有机碳储量的比例来看,其

占比最高。在垂直方向, 油松林的土壤有机碳储量随土层深度的增加呈现先减少后增加的趋势, 这同样是由于油松林深层土壤的水溶性有机碳含量偏高导致。

不同植被类型平均土壤水溶性有机碳含量大小为油松林、青海云杉、草地、灌丛。通常土壤有机碳含量较高的土壤其土壤水溶性碳含量也较高。草地的土壤有机碳含量要小于灌丛, 但其水溶性有机碳含量却高于灌丛, 这与一些研究结果不一致^[40], 但也有研究得出相似结论^[41], 具体原因有待进一步深入研究。在垂直方向, 青海云杉林土壤水溶性有机碳含量随土层的增加呈递减趋势, 这是因为土壤水溶性有机碳在很大程度上取决于土壤总有机碳含量, 随着土层的加深, 土壤总有机碳减少, 同时, 下层土壤受生物环境影响少, 土壤有机碳驻留时间长, 有效性也随之降低^[42]; 其他植被类型土壤水溶性有机碳含量随土层的增加呈现先减少后增加的趋势, 这与潘婷等^[43]、季波等^[44]的研究结果相似。不同植被类型的植物群落结构、物种多样性、地表凋落物(种类、数量、分解程度、分解产物)、土壤容重、土壤 pH 等理化性质不同, 导致不同植被类型土壤水溶性有机碳积累程度存在差异^[20]。

水溶性有机碳占总有机碳的百分比越大, 表明土壤有机质越容易被微生物分解, 质量也就越高, 其土壤碳库的稳定性越差^[45]。各植被类型在 0~60 cm 土层的水溶性有机碳占总有机碳比例最大值为草地, 这是由于草地的土层结构疏松, 通气性较好, 根系发育, 生物活动强烈, 因而枯枝落叶分解较快, 加之草地所处海拔较低, 温度高土壤有机质相对来说更容易分解^[46], 同时也说明罗山草地土壤碳库稳定性较差, 易受到外界干扰。

在垂直土层方向, 灌丛和草地土壤水溶性有机碳占有有机碳比例随土层的增加呈上升趋势, 这可能是由于水溶性有机碳随水分向下层土壤渗透的缘故, 同时证明深层土壤较表层土壤具有更稳定的保护效果^[32]; 而油松和青海云杉林土壤水溶性有机碳占有有机碳比例随土层的增加呈先上升后下降的趋势, 这可能是由于油松和青海云杉林分布区的海拔较高, 日照强烈, 降水量较低且相对集中, 表层土壤水分蒸发较快, 渗透到深层土壤中的水分有限, 从而造成 20~40 cm 土层土壤水分

含量较高, 0~20 cm 及 40~60 cm 土层土壤水分含量相对较低, 进而影响了水溶性有机碳占有有机碳比率的垂直土层分配, 土壤水溶性有机碳的分配比例随土层加深表现出先上升后下降的趋势^[47]。

研究表明, 土壤有机碳和水溶性有机碳之间具有密切关系^[48-50]。但本研究中, 各植被类型的土壤有机碳和水溶性有机碳间均未表现出显著性相关, 可能是由于夏季土壤中的微生物活性强, 对水溶性有机质消耗较多, 水溶性有机碳总处于不断产生和消耗的动态平衡中, 导致其与总有机碳的相关性较差^[51]; 油松林、灌丛和草地的土壤有机碳均与土壤 pH 存在显著负相关, 这与前人^[52-54]的研究结果一致, 这是由于土壤 pH 直接影响土壤微生物的种类、数量和活性, 限制微生物的种类^[55]。随着土壤 pH 值的下降, 微生物活性减弱, 致使土壤有机碳周转下降, 从而有利于土壤有机碳的积累^[56]; 油松林、青海云杉林和草地的土壤有机碳与全盐含量、电导率、土壤含水量、土壤温度和土壤 pH 的相关性均不显著, 可能是由于其含量通过变量的多级间接影响产生作用^[57]; 土壤水溶性有机碳与各土壤理化因子间的相关性均未达显著水平, 可能是由于水溶性有机碳受到众多因子的制约影响较为复杂^[58]。

宁夏罗山国家级自然保护区不同植被类型土壤有机碳含量及储量随土层深度的增加呈逐渐减少的趋势。4 种典型植被类型土壤有机碳含量及其碳储量均表现为油松林、青海云杉、灌丛、草地, 且差异显著, 说明植被的覆盖以及人为活动干扰的减少对于提高森林土壤有机碳储量以及维持森林土壤碳库的稳定性至关重要。青海云杉和油松林土壤有机碳储量均高于全国水平, 说明罗山森林生态系统具有巨大的固碳潜力。草地的土壤水溶性有机碳分配比例最高, 表明其土壤有机质易被分解, 同时也说明草地易受到外界干扰, 其土壤碳库稳定性较差。因此, 干旱半干旱区退耕还林还草和禁牧政策的实施对于提高森林生态系统的稳定性及其固碳潜力具有积极作用。

参考文献

- [1] STOCKMANN U, ADAMS M A, CRAWFORD J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of se-

- questration of soil organic carbon [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 164: 80–99.
- [2] TIFAFI M, GUENET B, HATTE C. Large differences in global and regional total soil carbon stock estimates based on SoilGrids. HWSD, and NCSCD: Intercomparison and evaluation based on field data from USA, England, Wales, and France [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(1): 42–56.
- [3] 武燕, 黄青, 刘讯, 等. 西南喀斯特地区马尾松人工林林龄对土壤理化性质的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 48(3): 99–107.
- [4] 窦艳星, 侯琳, 马红红, 等. 间伐对松栎混交林土壤活性有机碳的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(5): 64–69.
- [5] HAYNES R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview [M]. *Advances in Agronomy*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2005: 221–268.
- [6] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 130–135.
- [7] 孙思琦, 裴晓娜, 韩锐, 等. 降解剂对森林凋落物可溶性有机碳含量的影响及凋落物降解模式比较研究 [J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 2005–2012.
- [8] 张金硕, 李素艳, 孙向阳, 等. 山东省不同植被类型土壤有机碳及其组分分布特征 [J]. *土壤*, 2024, 56(2): 350–357.
- [9] 马继龙, 王新英, 刘茂秀, 等. 塔里木河中游不同生境胡杨林土壤有机碳及活性组分特征 [J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(2): 182–188.
- [10] 王军广, 赵志忠, 王鹏, 等. 海南岛东南部热带雨林土壤易氧化有机碳特征及影响因素 [J]. *西部林业科学*, 2023, 52(2): 106–112, 131.
- [11] 胡澳, 赵毅辉, 吴继来, 等. 采伐后植被自然恢复对马尾松次生林土壤有机碳及其活性组分的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(6): 1189–1200.
- [12] 陈晶亮, 杨慧, 刘超, 等. 宁夏罗山自然保护区3种典型林分凋落物和土壤层水源涵养能力综合评估 [J]. *生态学报*, 2023, 43(19): 7987–7997.
- [13] 李涛, 姬学龙, 杨贵军, 等. 宁夏罗山拟步甲物种多样性及分布特点 [J]. *西北农业学报*, 2012, 21(2): 184–189.
- [14] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 蔡文良, 谢艳云, 唐雯. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳储量和垂直分布特征 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(8): 1514–1521.
- [16] 张振源, 顾晓娟, 吴妙兰, 等. 雷州半岛不同林龄桉树人工林土壤碳氮磷和易氧化有机碳的特征 [J]. *林业与环境科学*, 2024, 40(3): 87–94.
- [17] 吴芳, 孙慧兰, 田中平, 等. 天山西部山地森林土壤有机碳沿海拔的分布格局及环境驱动因素 [J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(4): 715–725.
- [18] 黄斌, 王泉泉, 李定强, 等. 南岭山地土壤有机碳及组分海拔梯度变化特征 [J]. *土壤通报*, 2022, 53(2): 374–383.
- [19] 李文慧, 陈浩楠, 南雄雄, 等. 宁夏旱区枸杞/覆盖作物种植体系对土壤活性有机碳库的影响 [J]. *生态学杂志*, 2024, 43(5): 1324–1332.
- [20] 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 等. 海南琼中不同林龄橡胶林土壤有机碳组分及其影响因素 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2023, 38(5): 886–893.
- [21] 庞丹波. 断陷盆地区典型林分土壤有机碳组分特征研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [22] 刘晓, 黄林, 郭康莉, 等. 施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 [J]. *环境科学*, 2017, 38(3): 1218–1226.
- [23] 李研妮. 树种多样性促进亚热带喀斯特森林土壤有机碳累积的微生物机制 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2023.
- [24] 鲍艳, 魏宇晨, 南素兰, 等. 全球 2°C 温升背景下青藏高原植被对气候变化的响应 [J]. *高原气象*, 2023, 42(1): 49–59.
- [25] DAWUD M S, RAULUND – RASMUSSEN K, DOMISCH T, et al. Is tree species diversity or species identity the more important driver of soil carbon stocks, C/N ratio, and pH? [J]. *Ecosystems*, 2016, 19(4): 645–660.
- [26] 郭晓伟, 张雨雪, 尤业明, 等. 凋落物输入对森林土壤有机碳转化与稳定性影响的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(9): 2352–2361.
- [27] 刘秉儒. 贺兰山东坡典型植物群落土壤微生物量碳、氮沿海拔梯度的变化特征 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 883–888.
- [28] 王平, 俞筱押, 丁智强, 等. 海拔梯度和原生林转换对北热带山地土壤有机碳密度的影响 [J]. *土壤通报*, 2024, 55(2): 391–400.
- [29] WU M, CHEN L, MA J, et al. Aggregate-associated carbon contributes to soil organic carbon accumulation along the elevation gradient of Helan Mountains [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 178: 108926.
- [30] 程积民, 金晶炜, 田瑛, 等. 宁夏森林植被及土壤碳密度分布特征 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(13): 109–117.
- [31] KAISER K, GUGGENBERGER G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7–8): 711–725.
- [32] 朱丽琴, 黄荣珍, 段洪浪, 等. 红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 249–257.
- [33] 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, 等. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响 [J]. *植物生态学报*, 2018, 42(5): 595–608.
- [34] 范志平, 王琼, 李法云. 辽东山地不同森林类型土壤有机碳季节动态及其驱动因子 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(11): 3220–3230.

- [35] 王霖娇, 盛茂银, 杜家颖, 等. 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[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1358-1365.
- [36] 陈小花, 杨青青, 余雪标, 等. 热带海岸典型森林类型土壤有机碳储量和碳氮垂直分布特征[J]. 热带作物学报, 2017, 38(1): 38-44.
- [37] 张雄志, 张慧芳, 王晨林, 等. 暖温带森林土壤有机碳含量和碳储量的海拔梯度格局及环境解释[J]. 生态学杂志, 2024, 43(10): 2979-2987.
- [38] 朱柳霏, 戴艳花, 黎立港, 等. 猫儿山自然保护区不同林分类型土壤有机碳储量及其剖面分配特征[J]. 土壤通报, 2024, 55(4): 968-973.
- [39] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 1: 100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [40] 刘涛泽, 刘丛强, 张伟, 等. 喀斯特地区坡地土壤可溶性有机碳的分布特征[J]. 中国环境科学, 2009, 29(3): 248-253.
- [41] 罗海波, 刘方, 刘元生, 等. 喀斯特石漠化地区不同植被群落的土壤有机碳变化[J]. 林业科学, 2009, 45(9): 24-28.
- [42] 陈小花, 余雪标, 薛杨, 等. 文昌滨海台地不同森林类型土壤 DOC, DON 库比较研究[J]. 广东农业科学, 2015, 42(8): 38-43.
- [43] 潘婷, 曾六福, 曾从盛, 等. 互花米草入侵对闽江河口裸滩湿地土壤有机碳的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 84-90.
- [44] 季波, 何建龙, 吴旭东, 等. 宁夏典型天然草地土壤有机碳及其活性组分变化特征[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 24-35.
- [45] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 523-526.
- [46] 曹迎秋. 土壤微生物对土壤有机质分解的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
- [47] 王莹, 刘淑英, 王平. 不同土地利用方式下秦王川灌区土壤活性有机碳库的变化[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(5): 103-108.
- [48] 黄小辉, 冯大兰, 朱恒星, 等. 三峡库区马尾松林土壤有机碳的组成及含量[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(2): 38-43.
- [49] 张文敏, 吴明, 王蒙, 等. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1351-1360.
- [50] 习丹, 旷远文. 城市化梯度上亚热带常绿阔叶林土壤有机碳及其组分特征. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2149-2155.
- [51] 程彩芳, 李正才, 周君刚, 等. 北亚热带地区退化灌木林改造为人工阔叶林后土壤活性碳库的变化[J]. 林业科学研究, 2015, 28(1): 101-108.
- [52] 向慧敏, 温达志, 张玲玲, 等. 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6089-6099.
- [53] 冯锦, 崔东, 孙国军, 等. 新疆土壤有机碳与土壤理化性质的相关性[J]. 草业科学, 2017, 34(4): 692-697.
- [54] 樊子豪, 崔鸿侠, 沈琛琛, 等. 神农架林区天然次生林土壤有机碳分布及影响因素[J]. 生态学报, 2024, 44(16): 7130-7139.
- [55] 张文娟, 曾陆金, 王维奇, 等. 闽江河口湿地空心莲子草土壤碳库研究[J]. 湿地科学与管理, 2011, 7(1): 51-55.
- [56] 方晰, 徐桂林, 洪瑜, 等. 湘中丘陵区不同土地利用方式下土壤有机碳密度[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 54-58.
- [57] 杨君珑, 张学丽, 曹兵, 等. 宁夏罗山典型植被类型的土壤活性有机碳组分研究[J]. 西部林业科学, 2017, 46(4): 61-66.
- [58] 白义鑫, 盛茂银, 胡琪娟, 等. 西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1607-1616.