

拱坝河流域 5 种森林类型土壤有机碳的分布特征

赵栋^{1,2}, 权丽^{1,2}, 屠彩芸^{1,2}, 郭星^{1,2}

(1. 白龙江林业管理局林业科学研究所, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃白龙江森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 舟曲 746300)

摘要: [目的] 研究拱坝河流域典型森林土壤有机碳含量和有机碳密度的分布特征, 为深入推进森林多目标经营工作提供科学依据。[方法] 通过实地调查取样和室内实验测定。[结果] ①人工云杉林 SOC 含量平均为 (32.5 ± 21.82) g/kg, 0—60 cm SOCD 为 (13.85 ± 6.98) kg/m²; ②不同土壤深度, 土壤密度差异显著; 随土壤深度增加, 5 种森林类型的土壤有机质, 全 N, 全 P, 全 K, 有效 P 及速效 K 含量呈递减趋势。③0—60 cm 土层含量与自然含水量, 全 N, 全 K, 速效 K 均呈极显著或显著正相关, 与土壤密度呈极显著负相关; SOCD 与土壤理化性质表现出一致的相关性。[结论] 研究区不同森林类型土壤有机碳含量和有机碳密度受多种因素的影响, 在林分结构、土壤理化特性、树种特性等多种因素的共同影响下, 土壤有机碳和有机碳密度表现出明显的差异性。

关键词: 典型森林类型; 土壤有机碳; 土壤养分; 拱坝河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)06-0054-07

中图分类号: S153

文献参数: 赵栋, 权丽, 屠彩芸, 等. 拱坝河流域 5 种森林类型土壤有机碳的分布特征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 54-60. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.009. Zhao Dong, Quan Li, Tu Caiyun, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon in typical forestlands in drainage basin of Gongba River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 54-60.

Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon in Typical Forestlands in Drainage Basin of Gongba River

ZHAO Dong^{1,2}, QUAN Li^{1,2}, TU Caiyun^{1,2}, GUO Xing^{1,2}

(1. Institute of Forestry Science, Bailongjiang Forestry Management Bureau of Gansu Province, Lanzhou,

Gansu 730070, China; 2. Gansu Bailongjiang National Forest Ecosystem Research Station, Zhouqu, Gansu 746300, China)

Abstract: [Objective] The distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) content and density (SOCD) in typical forests of Bailongjiang region were studied in order to provide a scientific basis for further promoting multi-objective forest management. [Methods] Field investigation, sampling and laboratory test were used. [Results] ① The mean SOC content of artificial spruce forest was (32.5 ± 21.82) g/kg, and SOCD was (13.85 ± 6.98) kg/m² in the soil depth of 0—60 cm. ② The density of soil is significantly different in the different soil depths, and the content of soil organic matter, total N, total P, total K, effective P and K in five forest types showed a trend of decline with the increase of soil depth. ③ Content of soil in 0—60 cm layer was positively correlated with natural water content, total N, total K and effective K, while it had a significantly negative correlation with soil density. SOCD showed a consistent correlation with physicochemical properties of soil. [Conclusion] The content and density of SOC in the different forest types are affected by many factors in the study area. Under the influence of those factors such as stand structure, soil physical and chemical characteristics, and tree characteristics, the content and density of SOC showed a significant difference between the different forest types.

Keywords: typical forest type; soil organic carbon; soil nutrients; drainage basin of Gongba river

土壤有机碳是土壤物理结构和化学养分的组成核心指标之一, 其含量的高低是表征土壤质量状况物质, 不仅能够维持良好的土壤结构, 也是土壤肥力的一个重要因子^[1-3]。在全球气候变暖背景下, 土壤

有机碳库已经成为全球碳循环研究的重点之一^[4]。森林是陆地生态系统中最重要碳库,森林土壤有机碳库在维持森林立地生产力以及全球碳平衡过程中起重要作用^[5-6]。全球的碳储量大约为 1.0×10^8 Pg,其中约 1 500 Pg 是以有机质形态储存于土壤中^[7],森林土壤中的碳占全球土壤有机碳的 73%^[8]。森林土壤有机碳库贮量的微小变化都可显著地引起大气 CO₂ 浓度的改变^[9]。土壤有机碳已成为进行森林可持续经营可参考的重要依据之一^[10]。

目前,有关土壤有机碳的研究主要包括土地利用变化^[11]、人为干扰^[12]、森林经营措施^[13]对土壤有机碳的影响等方面。对土壤有机碳及密度既有从国家、区域等宏观尺度上进行估算,也有对具体森林类型进行取样分析。本研究以拱坝河流域 5 种主要森林类型为研究对象,通过分析不同森林类型土壤有机碳(SOC)含量和有机碳密度(SOCD)的分布特征、有机碳组分随土壤深度的变化;对 5 种森林类型 SOC 和其他理化性质含量进行了统计描述、方差分析及相关性分析,为下一步更好地进行森林多目标经营提供科学依据。

1 研究区概况

拱坝河流域是白龙江的一个重要支流,位于甘肃

省甘南藏族自治州舟曲县境内,东经 103°57'05"—104°42'05",北纬 33°13'10"—34°10'00",属西秦岭地质构造带南部山地,为亚热带大陆湿润气候,温凉湿热、冬寒夏凉,年平均气温 12.9℃,最高气温 35.2℃,最低气温 -10.2℃;年降雨量 449.2 mm;无霜期 230 d 左右;冻土期 80 d 左右。

2 研究方法

本研究自 2015 年开始,在阅读大国内外文献的基础上,明确研究方向和内容,2015—2016 年完成外业调查,并进行内业实验测定和整理分析。外业工作内容包:设置标准样地、样地概况资料的收集、植被调查、土壤典型剖面调查及土壤样品的采集等。

2.1 样地的选择及布设

在充分了解拱坝河流域森林植被基本概况的基础上,根据地形、地貌、水文情况、岩石和母质类型等因素选择采样区。在 2015—2016 年,共设置样地 60 块,其中人工云杉林 10 块、冷杉天然林 10 块、天然针阔混交林 8 块、桦树次生林和灌木林各 16 块,样地间垂直和水平距离不小于 200 m,样地面积为 0.025 hm²。样地调查包括:经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位、树高、胸径、郁闭度和林龄等。5 种森林类型样方情况详见表 1。

表 1 研究区 5 种森林类型样地基本情况

林分类型	海拔/ m	坡度/ (°)	林龄/ a	树稿/ m	胸径/ cm	郁闭度	林分密度/ (株·hm ⁻²)
云杉人工林	2 100~1 600	5~16	30~50	4.5~25.6	6.7~23.5	0.60~0.94	780~1 340
冷杉天然林	2 600~3 200	6~25	60~120	6.7~28.2	5.8~38.9	0.53~0.90	360~1 120
天然针阔混交林	2 100~2 800	5~16	21~46	4.3~24.7	5.3~24.6	0.64~0.095	800~1 670
桦树次生林	2 400~2 800	8~21	18~40	3.8~19.6	4.2~19.2	0.54~0.95	630~1 970
灌木林	1 800~2 500	3~12	28~50	1.6~4.7	—	0.32~0.86	960~1 780

2.2 土壤样品的采集、测定与分析

2.2.1 土壤样品的采集及处理 剖面土壤样品的采集:土样采集时间为 2015 年 7 月和 2016 年 7 月,每个样地挖取典型土壤剖面 1 个,按 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 从下向上分层采集环刀土样,用以测定土壤密度和自然含水量。混合土样的采集:在各样地内,以 S 形路线,随机选取 5—7 个采样点,每个采样点用土钻分别取 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 的土壤,最后将各点同一土层的土壤放在塑料薄膜上去除根系和植物残体,混合均匀并用四分法取 1 kg 左右待测土样,装入贴有标签的布袋。将采集的土样带回实验室内自然风干,磨细、过 2,1,0.25 mm 土壤筛,用于测定土壤基本理化性质。

2.2.2 土壤样品测定 ①土壤物理性质指标及其测定方法。采用环刀法测定土壤密度;采用实验室铝盒烘干法测定土壤含水量;土壤质地的确定采用比重计法计算各粒级土粒的含含量(水土比 2.5:1)。②土壤化学性质的测定。土壤值采用酸度计法(水土比 2.5:1),土壤有机质含量的测定用重铬酸钾外加热法,全氮采用半微量开氏法,全磷采用酸溶—钼锑抗比色法,有效磷采用盐酸—氟化铵法,全钾采用氧氟酸—高氯酸法,速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度计法^[14]。③土壤碳组分的测定方法。土壤微生物碳的测定采仿熏蒸浸提法(CFE)方法;水溶性有机碳采用去离子水提取(水与土质量比为 2:1,用滤膜抽滤,滤液在岛津 TOC-Vcph 总有机碳分析测定^[15-16]。惰性有机碳的测定采用酸水解法。

2.2.3 土壤有机碳密度计算 土壤有机碳密度是土壤有机碳随土壤深度变化的近以函数,是评价土壤有机碳储量的重要指标。某一土层的有机碳密度($SOC_i, \text{kg/m}^2$)的计算公式为^[17]

$$SOC_i = C_i \cdot D_i \cdot E_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中: C_i ——土壤有机碳含量(g/kg); D_i ——土壤密度(g/cm^3); E_i ——土层厚度(cm); G_i ——直径 >2 cm 的石砾含量(体积百分比)。

一定剖面深度的土壤有机碳密度计算公式为

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

式中: n ——土层数。本研究中 $n=4$ 。

2.3 数据处理

数据采用 Excel 2003 软件进行汇总分析,采用 SPSS 13.0 软件进行单因素方差分析、相关性分析和 Duncan 多重比较。

3 结果与分析

3.1 人工云杉林土壤有机碳分析

由表 2 可知,人工云杉林随着土壤深度的增加,土壤有机碳密度也呈下降趋势,0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 土层中土壤有机碳密度分别为(48.85 ± 15.43) g/kg , (34.64 ± 12.35) g/kg , (26.11 ± 10.89) g/kg 和 (15.33 ± 21.82) g/kg ,从而得到 0—60 cm 剖面土壤有机碳密度为 $13.85 \pm 6.98 \text{ kg/m}^2$ 。方差分析及多重比较结果表明不同土层之间的土壤有机碳密度差异均极显著($p < 0.01$),变异系数分别为 31.58%,35.65%,41.71%和 66.60%。

表 2 研究区不同土壤深度有机碳含量 g/kg

土壤深度/cm	均值	最大值	最小值	标准差	变异系数/%
0—10	48.85 ^a	101.23	33.07	15.43	31.58
10—20	34.64 ^b	73.21	14.71	12.35	35.65
20—40	26.11 ^b	56.58	10.58	10.89	41.71
40—60	15.33 ^b	42.77	7.23	10.21	66.60
0—60	32.52	101.23	7.23	21.82	67.10

注:小写字母表示不同土层间差异显著($p < 0.05$)。下同。

土壤有机碳密度计算结果见表 3。随着土壤深度的增加,土壤有机碳密度也呈下降趋势,0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 土层中土壤有机碳密度分别为(5.21 ± 1.46) kg/m^2 , (3.78 ± 1.40) kg/m^2 , (3.32 ± 1.02) kg/m^2 , 和 (2.01 ± 0.85) kg/m^2 ,从而得到 0—60 cm 剖面土壤有机碳密度为 $13.85 \pm 6.98 \text{ kg/m}^2$ 。方差分析及多重比较结果表明不同土层之间的土壤有机碳密度差异均极显著($p < 0.01$)。

表 3 研究区不同土壤深度有机碳密度 kg/m^2

土壤深度/cm	均值	最大值	最小值	标准差	变异系数/%
0—10	5.21 ^a	7.01	1.98	1.46	28.02
10—20	3.78 ^b	5.98	1.8	1.4	37.04
20—40	3.32 ^{bc}	4.72	1.65	1.02	30.72
40—60	2.01 ^c	3.68	1.01	0.85	42.29
0—60	13.85	20.03	5.98	6.98	50.40

3.2 人工云杉林土壤碳组分分布规律

人工云杉林土壤微生物碳(MBC)含量垂直分布如图 1 所示。0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm 和 40—60 cm 土层含量变化范围分别为:(857 ± 232) mg/kg , (596 ± 126) mg/kg , (376 ± 114) mg/kg 和 (211 ± 113) mg/kg 不同土层 MBC 占土壤有机碳的百分比分别是 1.8%,1.7%,1.4%和 1.4%。含量随着土壤深度的增加呈减小趋势,表层土壤最大,为 (857 ± 232) mg/kg 。0—40 cm 范围内,占整个剖面 MBC 含量的 87.6%。方差分析结果显示不同土层间差异显著,多重比较得到 0—40 cm 土层中 MBC 含量显著高于下层土壤。

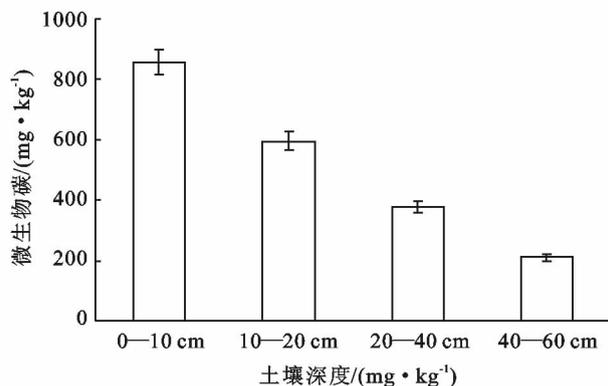


图 1 土壤微生物碳含量随土壤深度的变化

WSOC 含量垂直分布如图 2 所示,0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 土层含量变化范围分别为 203~586 mg/kg ,180~460 mg/kg ,140~450 mg/kg ,160~240 mg/kg 平均含量分别是 403,267,212,187 mg/kg 变异系数分别为 54%,50%,68%和 46%,WSOC 占总有机碳的比重为 0.4%~1.2%。0—60 cm 范围内,WSOC 含量也是随着土壤深度的增加呈减小趋势,表层土壤含量最大,为 $403 \pm 210 \text{ mg/kg}$ 。

惰性有机碳含量垂直分布如图 3 所示。由图 3 可知,0—60 cm 含量介于 7.58%~13.24%,平均为 4.47%。惰性有机碳在 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 土层含量的变化范围分别为 2.98%~5.76%,2.56%~3.79%,1.12%~3.24%,1.55~3.03%。平

均含量分别占总有机碳的 4.37%, 3.10%, 2.19% 和 2.10%, 惰性有机碳含量也是随着土壤深度的增加呈减小趋势, 但是各土层间差异不显著。

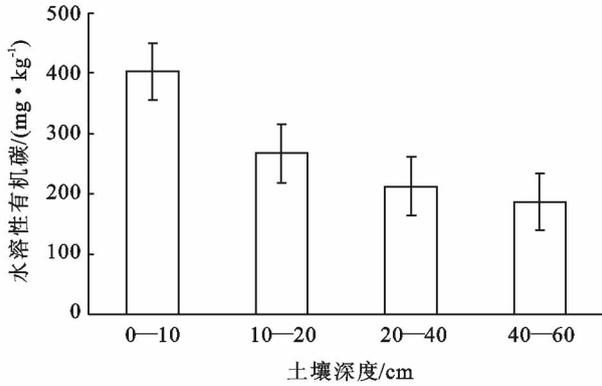


图 2 土壤水溶性有机碳随土壤深度的变化

3.3 人工云杉林土壤养分的垂直分布特征及异质性

3.3.1 土壤养分的垂直分布 由表 4 可以看出, 随土壤深度增加土壤养分具有明显的层次性。3 个土层土壤 pH 值的变异程度都较低, 土壤 pH 值都随着土壤深度的增加而变大。对不同土壤深度值进行方差分析和多重比较, 结果表明, 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土层间呈极显著差异 ($p < 0.01$)。随土壤

深度增加, 土壤有机质, 全 N, 全 P, 全 K, 有效 P 及速效 K 含量呈递减趋势, 方差分析及多重比较结果表明: 土壤有机质、全 N, 全 P, 全 K 和速效 K 含量在 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土层之间差异显著 ($p < 0.05$); 有机质、全 N 和全 P 在 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 各土层间差异均达到极显著水平 ($p < 0.01$), 土壤全 K 和速效 K 含量 0—20 cm 与 20—40 cm 和 40—60 cm 呈极显著差异 ($p < 0.01$), 而 20—40 cm 和 40—60 cm 差异不显著 ($p > 0.05$); 土壤有效 P 含量在各土层间差异不显著 ($p > 0.05$)。

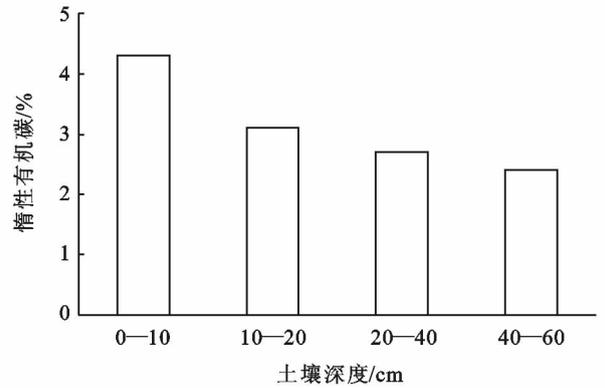


图 3 土壤惰性有机碳随土壤深度的变化

表 4 研究区不同土层养分含量分析

土壤养分	土层深度		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
pH 值	5.52 ± 0.28 ^{Aa}	5.57 ± 0.29 ^{ABab}	5.59 ± 0.30 ^{Bb}
有机质/(g·kg ⁻¹)	41.35 ± 22.65 ^{Aa}	23.52 ± 16.45 ^{Bb}	13.40 ± 11.62 ^{Cc}
全 N/(g·kg ⁻¹)	1.87 ± 1.03 ^{Aa}	1.14 ± 0.72 ^{Aa}	0.51 ± 0.34 ^{Cc}
全 P/(g·kg ⁻¹)	0.61 ± 0.27 ^{Aa}	0.50 ± 0.25 ^{ABb}	0.37 ± 0.18 ^{Bc}
全 K/(g·kg ⁻¹)	26.21 ± 3.48 ^{Aa}	24.07 ± 3.24 ^{Bb}	22.32 ± 3.36 ^{Bc}
有效 P/(g·kg ⁻¹)	23.32 ± 10.37 ^{Aa}	20.84 ± 10.43 ^{Aa}	19.99 ± 11.64 ^{Aa}
速效 K/(g·kg ⁻¹)	112.36 ± 42.51 ^{Aa}	87.50 ± 32.23 ^{Bb}	57.52 ± 28.54 ^{Bc}

注: 小写字母表示不同土层间差异显著 ($p < 0.05$); 大写字母表示不同土层间差异极显著 ($p < 0.01$)

3.3.2 土壤养分垂直分布异质性 对土壤养分的空间分布异质性进行分析, 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土层养分变异系数详见表 5。

由表 5 可以看出, 不同土层之间土壤值的变异系数均在 4.65%~5.22% 之间, 属弱度变异, 是变异程度最小的测定指标; 土壤有机质含量和有效 P 的变异系数较大, 并随深度增加而增大, 在 40—60 cm 土层

达到 75.55%, 属于中等变异; 全 K 含量的变异系数较小, 并且变异系数较稳定, 为 13.41%~15.07%, 变异系数也是随土壤深度增加而增大; 土壤全 N、全 P 和速效 K 含量在 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土层也均为中等变异, 变异系数介于 39.15%~74.00%, 并且变异系数均表现为土层 20—40 cm > 40—60 cm > 0—20 cm。

表 5 研究区不同土层土壤养分变异系数

土壤深度/cm	pH 值	有机质	全 N	全 P	全 K	有效 P	速效 K
0—20	4.65	48.79	54.28	49.13	13.41	50.53	39.15
20—40	4.79	62.18	74.00	57.61	13.57	57.29	44.58
40—60	5.22	75.55	61.59	53.43	15.07	63.79	43.31

3.4 不同森林类型不同土层土壤养分分析及异质性

5 种森林类型不同土层的土壤养分分析结果详见表 6。由表 6 可知,对于人工云杉林,土壤 pH 值随土壤深度增加而变大,各土层间差异不显著 ($p > 0.05$);土壤有机质,全 N,全 P 和速效 K 含量在不同土层均有不同程度的显著差异,有效 P 随土壤深度变化无显著变化。冷杉天然林土壤 pH 值、全 N 和有效

P 含量在 3 个土层间无显著差异 ($p > 0.05$);土壤有机质含量,全 N,全 P 和速效 K 在不同土层间均有显著差异。天然针阔混交林除土壤 pH 值外其他养分含量均随土壤深度有显著差异。桦树次生林和灌木林土壤 pH 值、全 P 和有效 K 在不同土层间无显著差异,而土壤有机质、全 N、全 K 和速效 K 含量在 3 个土层均表现有显著性差异。

表 6 研究区不同森林类型养分分析结果

森林类型	土层深度/cm	pH 值	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全 N/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全 P/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全 K/ ($g \cdot kg^{-1}$)	有效 P/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效 K/ ($mg \cdot kg^{-1}$)
人工云杉林	0—20	5.42±0.27 ^{AB}	44.22±13.45 ^{ABa}	1.95±0.66 ^{ABa}	0.36±0.19 ^a	28.18±4.11 ^{ABa}	30.33±5.16 ^A	123.07±34.21 ^a
	20—40	5.48±0.29	21.31±9.58 ^{ABb}	0.91±0.36 ^b	0.42±0.22 ^{ab}	26.67±2.63 ^{ABa}	30.84±7.96 ^A	75.78±30.56 ^b
	40—60	5.58±0.26	20.54±17.29 ^b	0.68±0.46 ^{Ab}	0.34±0.17 ^{Ab}	22.54±3.21 ^b	32.03±8.12 ^A	74.98±36.27 ^{Ab}
冷杉天然林	0—60	5.50±0.20 ^{AB}	27.54±9.70 ^{AB}	1.17±0.55 ^{Ab}	0.41±0.19	24.89±2.57 ^{AB}	31.21±5.47 ^A	94.44±21.36
	0—20	5.60±0.25 ^A	33.78±12.14 ^{Ba}	1.23±0.41 ^{Ba}	0.56±0.17 ^a	23.98±3.41 ^B	24.65±10.38 ^A	92.87±43.24 ^a
	20—40	5.63±0.28	24.64±17.23 ^{ABa}	0.98±0.26 ^a	0.44±0.21 ^{ab}	22.96±3.14 ^B	21.79±11.36	75.57±43.29 ^{ab}
	40—60	5.48±0.29	18.71±6.58 ^b	0.34±0.17 ^{Bb}	0.34±0.17 ^{Ab}	21.17±3.14	19.53±9.32 ^B	48.69±32.13 ^{Bb}
天然针阔混交林	0—60	5.64±0.18 ^A	23.79±9.13 ^B	0.86±0.42 ^B	0.45±0.16	23.15±2019 ^B	22.18±9.58 ^B	74.97±39.65
	0—20	5.44±0.23 ^{AB}	36.58±14.41 ^{Ba}	1.73±0.59 ^{ABb}	0.53±0.28 ^a	27.17±2.33 ^{Aa}	29.14±12.01 ^{Aa}	121.87±41.25 ^a
	20—40	5.42±0.29	19.35±9.48 ^{Bb}	0.78±0.41 ^b	0.34±0.19 ^{ab}	24.96±2.18 ^{ABb}	23.21±9.89 ^{Aab}	84.52±27.33 ^b
	40—60	5.54±0.31	12.26±17.83 ^b	0.47±0.32 ^B	0.19±0.12 ^{Bb}	24.56±1.98 ^b	18.16±10.26 ^{Bb}	61.02±21.12 ^{ABb}
桦树次生林	0—60	5.46±0.27 ^B	22.47±8.35 ^B	1.01±0.43 ^B	0.34±0.16	25.24±1.41 ^A	23.44±9.58 ^B	88.57±19.23
	0—20	5.39±0.44 ^B	52.78±29.38 ^{Aa}	2.14±1.21 ^{Aa}	0.45±0.35	28.46±3.17 ^{Aa}	21.36±4.98 ^B	112.31±42.89 ^a
	20—40	5.48±0.44	34.52±17.86 ^{ABb}	1.20±0.68 ^{ab}	0.43±0.31	26.79±4.12 ^{Ab}	20.22±5.66 ^B	91.02±41.12 ^{ab}
	40—60	5.61±0.41	22.44±20.52 ^b	0.79±0.59 ^{ABb}	0.29±0.17 ^{Ab}	23.96±4.41 ^b	11.59±7.02 ^B	72.50±31.28 ^{ABb}
灌木林	0—60	5.63±0.28 ^{AB}	39.55±24.21 ^A	1.63±1.12 ^A	0.41±0.25	26.35±2.96 ^A	21.13±5.02 ^C	90.68±33.29
	0—20	5.63±0.21 ^B	40.23±21.22 ^{Aa}	1.37±0.42 ^{ABb}	0.33±0.17 ^a	25.81±4.11 ^{ABa}	24.32±9.01 ^{Aa}	108.87±35.54 ^a
	20—40	5.53±0.33	31.62±23.08 ^{Ab}	0.54±0.14 ^b	0.31±0.11 ^{ab}	23.42±2.63 ^{ABa}	20.33±10.89 ^{Aab}	81.69±32.33 ^b
	40—60	5.61±0.28	23.54±17.33 ^b	0.44±0.19 ^B	0.24±0.23 ^{Bb}	20.54±1.17 ^b	17.16±8.65 ^{Bb}	71.36±31.54 ^{ABb}
0—60	5.57±0.33 ^{AB}	25.63±19.89 ^B	0.98±0.15 ^B	0.29±0.21	22.33±3.11 ^{AB}	21.44±9.78 ^B	86.71±33.21	

注:表中数据为平均值±标准差;不同大写字母表示不同林型—土层土壤各理化性质指标差异显著,小写字母表示同一林型不同土层的差异显著 ($p < 0.05$)。

3.5 土壤有机碳与土壤性质相关分析

3.5.1 不同土层土壤有机碳与土壤性质的相关性分析 如表 7 所示,从整个土壤剖面来看,土壤有机碳含量与自然含水量、全 N,全 K,速效 K 均呈极显著或显著正相关,其中与全氮量的相关系数最大,

为 0.782,与 pH 值和有效 P 相关性不显著;土壤有机碳含量与土壤密度呈极显著负相关 ($r = -0.353$, $p < 0.01$)。

土壤有机碳密度与土壤理化性质表现有一致的关系,此外还与土壤 pH 值呈显著负相关。

表 7 不同土层土壤有机碳与土壤性质的相关关系 ($n = 60$)

土层深度/cm	土壤有机碳	土壤性质							
		土壤密度	土壤含水量	pH 值	全 N	全 P	全 K	有效 P	速效 K
0—20	含量	-0.108	0.375 ^{**}	-0.091	0.852 ^{**}	0.402 ^{**}	0.269 [*]	-0.239	-0.189
	密度	-0.047	0.114	-0.062	0.666 ^{**}	0.309 [*]	0.212	-0.119	0.184
20—40	含量	-0.123	0.203	0.057	0.520 ^{**}	0.273 [*]	0.142	0.001	0.264
	密度	-0.054	0.098	-0.049	0.287 [*]	0.126	0.014	-0.202	0.102
40—60	含量	-0.045	0.040	0.101	0.209	0.095	-0.168	0.192	0.098
	密度	-0.040	0.039	-0.132	0.366 ^{**}	0.008	-0.135	0.069	0.121
0—60	含量	-0.353 ^{**}	0.327 ^{**}	-0.103	0.782 ^{**}	0.437 ^{**}	0.375 ^{**}	0.023	0.413 ^{**}
	密度	-0.427 ^{**}	0.215 ^{**}	-0.169 [*]	0.660 ^{**}	0.353 ^{**}	0.267 ^{**}	0.005	0.398 ^{**}

注: * 表示相关性显著 ($p < 0.05$), ** 表示相关性极显著 ($p < 0.01$)。下同。

3.5.2 不同森林类型土壤有机碳与土壤性质的相关性 人工云杉林土壤有机碳含量和碳密度与土壤密度呈极显著负相关,与全 N 呈极显著相关,相关系数分别为 0.858 和 0.893,土壤有机碳含量还与速效 K 呈显著正相关。冷杉天然林土壤有机碳含量与土壤密度呈显著负相关,与土壤全 N 呈显著相关;土壤有机碳密度与土壤密度呈极显著负相关,与土壤全 P,全 K 和速效 K 显著正相关。天然针阔混交林有机碳含量和有机碳密度与土壤全 N 呈极显著正相关,与土

壤密度呈极显著负相关,与 pH 值显著负相关,与全 P 有显著正相关关系,土壤有机碳含量还与全 K 和速效 K 呈显著正相关,土壤有机碳密度与速效 K 则有极显著相关关系。桦树次生林土壤有机碳含量与土壤密度显著负相关,与土壤全 N 极显著相关,还与土壤全 K 显著正相关;灌木林土壤有机碳含量与全 N 呈极显著的正相关,与全 K 呈显著的正相关,与土壤密度呈显著的负相关;有机碳密度仅与全 N 呈极显著正相关(表 8)。

表 8 研究区不同森林类型土壤有机碳与土壤性质的相关系数

林分类型	样本数	土壤有机碳	土壤性质							
			土壤密度	土壤含水量	pH	全 N	全 P	全 K	有效 P	速效 K
云杉人工林	30	含量	-0.568**	0.102	-0.082	0.858**	0.347	0.468	-0.340	0.653*
		密度	-0.667**	0.140	-0.214	0.893**	0.150	-0.342	-0.518	0.307
冷杉天然林	30	含量	-0.524*	0.220	-0.011	0.639*	0.319	0.487	-0.370	0.214
		密度	-0.697**	0.575	0.020	0.215	0.577*	0.652*	0.164	0.687*
天然针阔混交林	24	含量	-0.692**	0.361	-0.341*	0.813**	0.656*	0.650*	0.294	0.566*
		密度	-0.847**	0.243	-0.456*	0.687**	0.722*	0.403	0.184	0.688*
桦树次生林	48	含量	-0.421*	0.108	-0.289	0.800**	0.344	0.690*	-0.149	0.252
		密度	-0.286	0.516	0.131	0.715**	0.421	0.423	0.025	0.376
灌木林	48	含量	-0.534*	0.117	-0.312*	0.763**	0.414	0.688*	-0.151	0.312
		密度	-0.351	0.458	0.142	0.652**	0.508	0.397	0.038	0.411

3.6 土壤有机碳与土壤性质逐步多元回归分析

为了更加明确森林土壤性质对土壤有机碳的影响,找出对土壤有机碳有显著影响的土壤因子,应用逐步多元回归分析法建立土壤有机碳和土壤性质指标间的回归方程。土壤有机碳含量与土壤性质的标准多元回归方程为:

$$Y = -9.714 + 14.326X_1 + 13.143X_2 + 0.632X_3$$

式中:Y——土壤有机碳含量; X_1 ——土壤全 N; X_2 ——土壤全 P; X_3 ——土壤全 K。

将土壤有机碳密度与土壤性质的测定结果进行逐步多元回归分析,得到回归方程:

$$Y = 7.438 + 2.251X_1 - 3.141X_2$$

式中:Y——土壤有机碳密度; X_1 ——土壤全 N; X_2 ——土壤密度。

回归结果表明,土壤有机碳含量与土壤全 N,土壤全 P 和土壤全 K 建立回归方程,且每个变量的显著水平都小于 0.001。土壤有机碳密度与土壤全 N,土壤密度之间的多元回归方程,决定系数 R^2 分别为 0.673 和 0.697,可以反映出土壤有机碳和土壤性质的关系。

4 讨论与结论

(1) 云杉人工林 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm

和 40—60 cm 土层中土壤有机碳密度分别为 $(5.21 \pm 1.46) \text{ kg/m}^2$, $(3.78 \pm 1.40) \text{ kg/m}^2$, $(3.32 \pm 1.02) \text{ kg/m}^2$ 和 $(2.01 \pm 0.85) \text{ kg/m}^2$, 计算结果处于以前该区域的土壤有机碳密度估算值的范围内^[18], 而由于地理位置和经营活动的差异, 导致土壤有机碳具有一定的空间变异特征^[19], 不同森林类型的研究也会有差异。此外, 研究方法不统一也是有机碳估算结果不确定的一个重要原因, 特别是取样的深度和数量等。土壤有机碳含量和有机碳密度随土壤深度的增加而降低。土壤有机碳密度的分布与植被类型、人为干扰和演替过程有关, 其中表土有机碳受其影响最大^[20-21]。在森林生态系统中, 土壤中的有机物质主要来自于地表凋落物的分解, 表层土壤能够获得较多的森林凋落物, 这也是形成土壤有机碳表层富集的重要原因^[22]。有机碳密度还与土壤密度和直径大于 2 mm 的石砾含量有关, 所以有研究发现土壤有机碳密度随深度增加而增大。一些研究表明, 林地随着植被恢复和演替发展, 土壤有机碳密度也随之变化^[23]。其中, 植被恢复可增加表土层的非活性有机碳含量; 植被恢复演替还可以明显提高土壤有机碳和氮的含量^[24]。

(2) 对于土壤有机碳与土壤理化性质的相关性研究较多, 如土壤肥力与土壤有机质含量呈显著正相

关关系,而土壤有机碳含量增加,往往意味着土壤密度降低、土壤氮含量提高、值降低和土壤离子强度增强,本文有机碳相关结果与先前的这些报道一致^[25-26]。土壤因持水性能和黏粒所占比例不同也会影响土壤有机碳分布,一般情况下,土壤有机碳含量与黏粒含量呈显著正相关,黏土矿物对有机质具有稳定作用^[27]。另外,土壤的酸碱度、温度、水分和深度等因素,由于影响枯枝落叶的分解速率而对土壤有机碳产生影响。相关分析也反映了 SOC 和土壤性质之间的关系,在所有土层的 SOC 和 TN 的正相关关系,和全 P,全 K 和速效 K 的关系也与前人的研究结果一致^[28-29]。

[参 考 文 献]

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304 (5677): 1623-1627.
- [2] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context [J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20(3): 229-236.
- [3] 李顺姬,邱莉萍,张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [4] 马姜明,梁士楚,杨栋林,等. 桂北地区桉树林及其他 3 种森林类型土壤有机碳含量及密度特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1282-1287.
- [5] 俞元春,何晟, Wang G G, 等. 杉木林土壤渗滤水溶解有机碳含量与迁移[J]. *林业科学*, 2006, 42(1): 122-125.
- [6] 黄一敏,李心清,杨放,等. 中国西南喀斯特森林土壤有机碳空间变化及影响因素[J]. *地球与环境*, 2016, 44(1): 1-10.
- [7] 曹丽花,赵世伟. 土壤有机碳库的影响因素及调控措施研究进展[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(3): 177-182, 187.
- [8] 孙向阳,乔杰,谭笑. 温带森林土壤中的 CO₂ 排放通量[J]. *东北林业大学学报*, 2001, 29(1): 34-39.
- [9] 王丹,王兵,戴伟,等. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(5): 667-671.
- [10] 胡海清,陆昕,孙龙. 土壤活性有机碳分组及测定方法[J]. *森林工程*, 2012, 28(5): 18-22.
- [11] 文雯,周宝同,汪亚峰,等. 黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 6060-6069.
- [12] 魏亚伟,苏以荣,陈香碧,等. 人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 971-978.
- [13] 李正才,傅懋毅,杨校生. 经营干扰对森林土壤有机碳的影响研究概述[J]. *浙江林学院学报*, 2005, 22(4): 469-474.
- [14] 鲍士旦土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [15] 胡宗达. 亚高山灌丛和草甸土壤呼吸动态特征及其影响因素[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [16] 胡慧蓉,马焕成,罗承德,等. 森林土壤有机碳分组及其测定方法[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 1018-1024.
- [17] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.
- [18] 包琼. 白龙江干旱河谷自然恢复灌丛群落的土壤碳氮储量[J]. *四川农业大学学报*, 2014, 32(3): 277-282.
- [19] 唐国勇,黄道友,黄敏,等. 红壤丘陵景观表层土壤有机碳空间变异特点及其影响因子[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4): 753-759.
- [20] 程积民,程杰,杨晓梅. 黄土高原草地植被与土壤固碳量研究[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 401-411.
- [21] 李贵才,韩兴国,黄建辉,等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林不同干扰强度下土壤无机氮的变化[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1251-1256.
- [22] 朱双燕,王克林,曾馥平,等. 广西喀斯特次生林地表碳库和养分库特征及季节动态[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 237-242.
- [24] 贾国梅. 黄土高原地区植被演替和土地管理对土壤养分、微生物活性和群落结构的影响[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2006.
- [25] 赵光影,江姗,邵宗仁. 小兴安岭森林沼泽湿地土地利用变化对土壤活性碳组分的影响[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(6): 68-74.
- [26] 杨飞霞,曹广超,于东升,等. 宁夏引黄灌区不同类型土壤重组有机碳特征分析[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(6): 85-91.
- [27] 金峰,杨浩,赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. *土壤*, 2000(1): 12-18.
- [28] 邱虎森,苏以荣,陈香碧,等. 喀斯特高原典型小流域土壤有机碳及其组分的分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(10): 1956-1964.
- [29] 王红梅,谢应忠,王塍,等. 宁夏南部半干旱黄土丘陵区草地土壤水分物理特性研究[J]. *农业科学研究*, 2007, 28(3): 5-9.