

网络出版时间:2022-05-27 12:20 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.12.009
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220525.1552.008.html

色季拉山林线典型植被下土壤有机碳及其组分特征

张 萌^{1,2,3}, 卢 杰^{1,2,3}, 于德水^{1,2,3}, 张新生^{1,2,3}

(1 西藏农牧学院 高原生态研究所 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000;

2 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000;

3 西藏自治区高寒植被生态安全重点实验室 西藏 林芝 860000)

【摘 要】【目的】测定色季拉山林线附近 3 种典型植被下土壤有机碳(SOC)及其组分含量,并分析其相关性以及土壤理化性质的关系,探讨色季拉山典型植被类型下土壤有机碳及其组分特征,为该区域森林经营和管理提供参考。【方法】以西藏色季拉山林线 3 种典型植被类型(草甸、灌丛和乔木林)下 0~20 cm 土层土壤为研究对象,选择 9 个取样点采集 0~10 和 10~20 cm 土层土壤样品,测定土壤样品有机碳(SOC)及其组分(轻组有机碳(LFOC)、重组有机碳(HFOC)、可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)、颗粒有机碳(POC)和易氧化有机碳(EOC))的含量,并对土壤有机碳及其组分与土壤理化性质的相关性进行分析。【结果】草甸、灌丛和乔木林 3 种植被下,土壤 SOC、MBC 和 HFOC 含量表现为灌丛>乔木林>草甸,在灌木、乔木林和草甸土壤的 0~10 cm 土层,其 SOC 含量分别是 96.34, 95.85 和 66.15 g/kg, MBC 含量分别为 1 540.96, 611.02 和 511.40 mg/kg, HFOC 含量分别为 61.75, 58.65 和 41.02 g/kg;而在 10~20 cm 土层,其 SOC 含量分别为 65.76, 57.43 和 30.97 g/kg, MBC 含量分别为 289.90, 184.02 和 84.15 mg/kg, HFOC 含量分别为 40.77, 31.26 和 19.57 g/kg,且均以 0~10 cm 土层高于 10~20 cm 土层。土壤 EOC、POC 和 LFOC 含量表现为乔木林>灌丛>草甸,且均随着土层的加深而降低,在乔木林、灌丛和草甸土壤的 0~10 cm 土层,EOC 含量分别为 23.97, 21.84 和 14.26 mg/kg, POC 含量分别为 30.11, 24.94 和 12.96 g/kg, LFOC 含量分别为 12.55, 1.93 和 1.21 g/kg;而在 10~20 cm 土层,EOC 含量分别为 11.83, 10.62 和 4.68 mg/kg, POC 含量分别为 9.79, 6.29 和 5.32 g/kg, LFOC 含量分别为 5.50, 0.77 和 0.43 g/kg。草甸、灌丛和乔木林土壤的有机碳组分中, SOC 与 EOC、HFOC, EOC 与 POC 和 HFOC, 以及 POC 与 LFOC 之间均呈显著正相关关系($P<0.05$),且在乔木林土壤中, SOC 与 MBC、土壤含水率呈正相关关系,但其在灌丛林和草甸中相关性不明显。【结论】草甸、灌丛和乔木林土壤的有机碳及其组分之间存在差异性,说明色季拉山林线附近典型植被下土壤的有机碳及其组分受到植被类型的影响,且其分布具有表聚性。

【关键词】 土壤有机碳;活性有机碳组分;典型植被;色季拉山林线
【中图分类号】 S153.6⁺2 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2022)12-0077-10

Characteristics of soil organic carbon and its components under typical vegetation in Sejila forest line

ZHANG Meng^{1,2,3}, LU Jie^{1,2,3}, YU Deshui^{1,2,3}, ZHANG Xinsheng^{1,2,3}

(1 Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau, Ministry of Education, Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agricultural & Animal Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000, China;

2 Linzhi National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Tibet, Nyingchi, Tibet 860000, China;

3 Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security in Tibet, Nyingchi, Tibet 860000, China)

Abstract: 【Objective】 This study estimated soil organic carbon (SOC) and its components under typi-

【收稿日期】 2021-11-26
【基金项目】 科技部国家野外科学观测站(生态系统)运行补助项目(2021-2025);西藏高原森林生态教育部重点实验室研究生创新计划项目(XZA-JYBSYS-2021-Y11)
【作者简介】 张 萌(1997—),女,四川绵阳人,在读硕士,主要从事森林生态学研究。E-mail:1992339552@qq.com
【通信作者】 卢 杰(1973—),男,四川安岳人,教授,博士生导师,主要从事森林生态学研究。E-mail:tibetlj@163.com

cal vegetation near the Seljila Mountain, analyzed its correlation and relationship with soil environmental factors, and explored the characteristics of SOC and its components under typical vegetation types to provide the reference for the forest management and management of the area. 【Method】 Nine sampling sites were selected to collect soil samples in layers of 0—10 cm and 10—20 cm under three typical vegetation types of meadow, shrub and arbor forest at the Siljila forest line in Tibet. SOC and its components of light organic carbon (LFOC), recombinant organic carbon (HFOC), soluble organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), particulate organic carbon (POC) and easily oxidized organic carbon (EOC) were determined and analyzed. The correlation between soil organic carbon and its composition and soil physico-chemical properties was analyzed. 【Result】 SOC, MBC and HFOC contents were in the decreasing order of shrub > arbor forest > meadow. In 0—10 cm soil layer of shrub, arbor forest and meadow, SOC contents were 96.34, 95.85 and 66.15 g/kg, MBC contents were 1 540.96, 611.02 and 511.40 mg/kg, and HFOC contents were 61.75, 58.65 and 41.02 g/kg, respectively. In the soil layer of 10—20 cm, SOC contents were 65.76, 57.43 and 30.97 g/kg, MBC contents were 289.90, 184.02 and 84.15 mg/kg, and HFOC contents were 40.77, 31.26 and 19.57 g/kg, respectively. All contents in 0—10 cm soil layer were higher than those in 10—20 cm soil layer. EOC, POC and LFOC contents were in the decreasing order of arbor forest > shrub > meadow, and all decreased with the increase of soil layer. In the 0—10 cm soil layer of arbor forest, shrub and meadow, EOC contents were 23.97, 21.84 and 14.26 mg/kg, POC contents were 30.11, 24.94 and 12.96 g/kg, and LFOC contents were 12.55, 1.93 and 1.21 g/kg, respectively. In the soil layer of 10—20 cm, EOC contents were 11.83, 10.62 and 4.68 mg/kg, POC contents were 9.79, 6.29 and 5.32 g/kg, and LFOC contents were 5.50, 0.77 and 0.43 g/kg, respectively. There were positive correlations between SOC and EOC or HFOC, between EOC and POC or HFOC, and between POC and LFOC in the soil of meadow, shrub and arbor forests ($P < 0.05$). In the soil of arbor forest, SOC was positively correlated with MBC and soil water content. However, it was unknown in the irrigation forest and meadow. 【Conclusion】 There were differences in SOC and its components among meadow, shrub and arbor forests, indicating that they were affected by vegetation types and the distribution was surface clustering.

Key words: soil organic carbon; active organic carbon component; typical vegetation; Sejila forest line

土壤碳库约占陆地总碳库的 2/3, 土壤有机碳储量的微弱变化会影响到植被动态、全球气候变化以及碳循环和碳平衡^[1-2]。土壤碳主要包括无机碳和有机碳, 其中有机碳占比较多, 对总碳库的影响较大, 所以土壤碳储量根据有机碳含量来估算^[3-4]。土壤有机碳库的组成较为复杂, 大体上可以分为稳定性和不稳定性 2 种, 其中稳定性碳又被称为惰性有机碳, 理化性质比较稳定, 不容易被氧化或者水解^[5]; 不稳定性碳又被称为活性有机碳, 稳定性差, 容易被矿化或氧化, 移动快, 植物和土壤微生物容易利用。虽然活性有机碳的占比不大, 但却可以反映土壤的微弱变化, 在维持土壤碳平衡方面具有重要作用^[6]。

在全球土壤有机碳库中, 森林土壤有机碳约占 40%, 约为陆地碳库的 73%^[7]。森林有机碳库对全球有机碳库具有重要意义, 其微弱变化都会直接影响到全球土壤有机碳库的循环, 进而对生态功能的

稳定性和全球气候变化造成影响^[8-9]。因此, 对森林土壤有机碳储量及其组分开展研究, 有利于明确其在维持土壤碳平衡中的重要地位。西藏在全球生态和气候方面都属于极为独特的区域, 被认为是自然生态系统研究的天然实验室。目前, 关于西藏色季拉山土壤有机碳的研究涉及很多方面, 既有专门针对某一种植被类型的研究^[10-11], 也有根据海拔梯度进行的研究^[12], 还有专门针对不同坡向土壤有机碳特征的研究^[13-14], 但有关不同植被类型相同深度土层土壤有机碳的研究尚未见报道。由于土壤有机碳具有表聚性, 为此本研究选择西藏色季拉山林线 3 种典型植被类型(草甸、灌丛和乔木林)下 0~20 cm 土层的土壤为对象, 从土壤有机碳及其组分的含量特征及其相关性方面进行分析, 探讨这 3 种不同植被类型土壤有机碳及其组分的分布规律, 以期深入了解西藏色季拉山不同植被类型土壤有机碳的积累规律, 为该区域森林经营和管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

色季拉山属于念青唐古拉山余脉,处于西藏东南部林芝市内(位于北纬 29°10′—30°15′,东经 93°12′—95°35′),该区域常年受印度洋暖湿气流的影响^[15],气候类型属于高山寒温带,每年降水量和蒸发量分别为 1 100 和 550 mm 左右,年均温 0℃以下,最暖月和最冷月的平均气温分别为 10 和 -13℃左右^[16]。山体走向为西北—东南,平均坡度为 35°,垂直带性十分明显,在较大范围内形成了东西坡面,主峰海拔高达 5 200 m。色季拉山植被类型复杂多样,植被种类繁多、生长繁茂,植被类型垂直带谱明显,土壤以黄棕壤和山地棕壤为主^[17-18]。其中乔木林层树种主要有林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis*)、急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)、高山松(*Pinus densata*)、方枝柏(*Juniperus saltuaria*)等;灌丛层植物主要有雪层杜鹃(*Rhododendron nivale*)、白背紫斑杜鹃(*Rhododendron principes* var. *vellereum*)、林芝杜鹃(*Rhododendron nyingchiense*)、川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)、峨嵋蔷薇(*Rosa omeiensis*)、硬叶柳(*Salix sclerophylla*)等;草本层植物主要有珠牙蓼

(*Polygonum viviparum*)、工布乌头(*Aconitum kongboense*)、桃儿七(*Sinopodophyllum hexandrum*)、长鞭红景天(*Rhodiola fastigiata*)、西南手参(*Gymnadenia orchidis*)、西藏龙胆(*Gentiana tibetica*)、林芝报春(*Primula ninguida*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品采集 2021 年 7 月,在踏查基础上于色季拉山林线附近选取草甸、灌丛和森林样点(图 1),每个样点分别设置 3 个样方开展植被调查和取样,其中乔木林样方大小为 30 m×30 m,灌丛样方大小为 5 m×5 m,草甸样方大小为 1 m×1 m。草甸样点设置在色季拉观景台上方林线附近(94°39′23.60″E,29°36′66.35″N),海拔 4 657 m,坡向东偏西,坡度 14°;草甸平均高度 10 cm,盖度为 65%,优势种有西藏龙胆、珠牙蓼等。灌丛样点设置在色季拉观景台下方林线附近(94°41′36.45″E,29°37′06.94″N),海拔为 4 595 m,坡向为东,坡度 18°;灌丛平均高度 85 cm,盖度 70%,优势种有林芝杜鹃、硬叶柳等。乔木林样点设置在色季拉阳坡林线附近(94°42′26.98″E,29°39′03.59″N),海拔 4 446 m,坡向为东南,坡度 46°;乔木林平均高度 13.8 m,优势种为方枝柏。

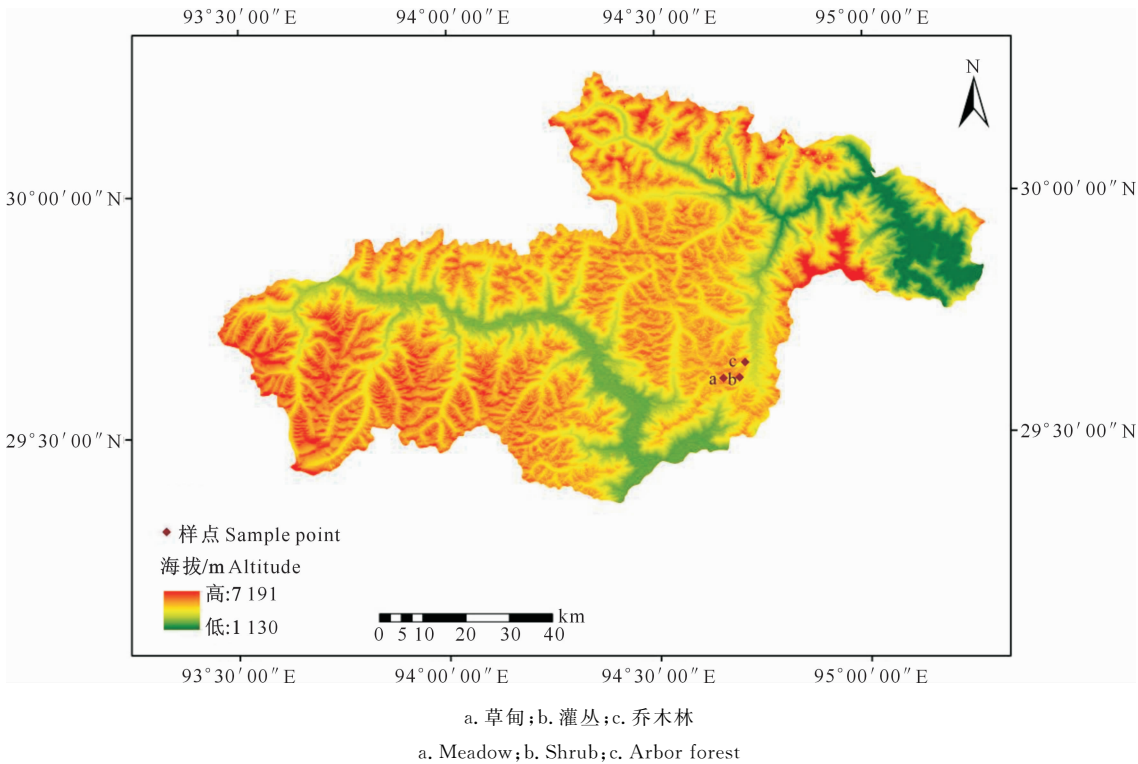


图 1 色季拉山林线选取的草甸、灌丛和乔木林样点分布

Fig. 1 Distribution of meadow, shrub and arbor forest samples near Sejila forest line

在 9 个草甸、灌丛和乔木林样方内分别向下挖取 20 cm 的土层,用 100 cm³ 的环刀分别取 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的土壤样品,取完环刀土样之后在各层分别取大约 500 g 的散土,做好标记放入密封袋中,带回实验室过筛装袋,其中一部分土样进行冷藏处理,另一部分土样进行晾干处理。在野外取样的同时现场测定土壤温度、含水率和电导率,其余指标在实验室进行测定。

1.2.2 土壤有机碳及其组分的测定 将野外采集的土壤样品带回实验室,采用烘干称质量法^[19]测定土壤含水率,采用环刀法测定土壤体积质量。将土壤样品晾干磨碎后,测定以下指标:土壤 pH 采用质量比 1:1 水土浸提后用酸度计测定;土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾外加热法测定;全 N 含量采用凯氏定氮法测定;全 P 含量采用钼锑抗比色法测定;全 K 含量采用火焰光度计法测定;速效氮含量采用凯氏定氮法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提,火焰光度法测定;土壤轻组分(LFOC)和重组分(HFOC)有机碳含量采用重铬酸钾滴定法测定;可溶

性有机碳(DOC)含量采用重铬酸钾氧化法测定;微生物量碳(MBC)含量采用氯仿熏蒸法测定;颗粒有机碳(POC)含量采用重铬酸钾滴定法测定;易氧化有机碳(EOC)含量采用重铬酸钾氧化法^[20-21]测定。

1.3 数据处理

采用 SPSS 23.0 软件对试验数据进行统计和单因素方差分析,采用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 色季拉山林线 3 种典型植被下土壤理化性质 西藏色季拉山林线 3 种典型植被下土壤的基本理化性质如表 3 所示。由表 3 可知,研究区土壤均呈酸性,pH 值都在 5 左右,但以草甸区土壤的 pH 值和土壤体积质量较大,除乔木林土壤 0~10 cm 土层 pH 值显著较小外,其余土层土壤 pH 值均无显著差异。不同植被下,土壤 pH 值和体积质量均随土层的加深而变大。草甸和乔木林的土壤温度随土层的加深而降低,而灌丛则表现出升高的趋势。土壤含水率和电导率在 3 种植被土壤中均随土层加深而呈降低趋势。

表 1 色季拉山林线典型植被下土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties under typical vegetation in Sejila forest line

植被类型 Vegetation type	土层/cm Soil layer	pH	体积质量/(g·cm ⁻³) Volume mass	温度/℃ Temperature	土壤含水率/% Soil water content	电导率/(mS·m ⁻¹) Conductivity
草甸 Meadow	0~10	5.40±0.05 Aa	0.83±0.01 Aa	11.43±0.29 Ac	31.52±1.68 Abc	18.33±4.84 Aa
	10~20	5.70±0.05 Aa	1.01±0.03 Aa	10.63±0.21 Aab	24.93±3.10 Abc	12.33±6.74 Aa
灌丛 Thicket	0~10	5.00±0.05 Aa	0.65±0.04 Aa	11.53±0.31 Ab	38.84±0.50 Aa	16.00±3.21 Aa
	10~20	5.30±0.05 Aa	0.74±0.04 Aa	12.07±0.29 Aa	35.55±1.14 Aa	6.00±0.57 Aa
乔木林 Arbor forest	0~10	4.83±0.18 Bb	0.82±0.10 Aa	14.77±1.77 Aa	41.53±2.32 Aa	5.67±1.33 Aab
	10~20	5.33±0.12 Aa	1.00±0.19 Aa	13.37±0.89 Aa	35.27±3.37 Aa	3.33±0.88 Aa

注:表中数据为“平均值±标准误”,不同大写字母表示同种植被不同土层间差异显著,不同小写字母表示不同植被同一土层间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: The data is mean±standard error. Different capital letters indicate significant difference in different soil layers of same vegetation, while different lowercase letters indicate significant difference in same soil layer among different vegetation (P<0.05). The same below.

2.2 色季拉山林线 3 种典型植被下土壤有机碳及其组分含量特征

色季拉山林线草甸、灌丛和乔木林林下 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤有机碳及其组分的统计分析结果见表 2。由表 2 可知,草甸土壤 0~10 cm 土层 SOC 和 POC、LFOC、HFOC 平均含量分别为 66.15,12.96,1.21 和 41.02 g/kg,方差分别为 215.18,13.03,0.03,16.03;MBC、DOC、EOC 平均含量值分别为 511.40,132.04 和 14.26 mg/kg,方差分别为 100 323.25,589.37,18.38。在 10~20 cm 土层,SOC 和 POC、LFOC、HFOC 含量平均值

分别为 30.97,5.62,0.43 和 19.57 g/kg,方差分别为 40.27,15.72,0.03,23.63;MBC、DOC、EOC 含量平均值分别为 84.15,126.06 和 4.68 mg/kg,方差分别为 105.51,1 011.60,0.33。灌丛土壤 0~10 cm 土层 SOC 和 POC、LFOC、HFOC 含量平均值分别为 96.34,24.94,1.93 和 61.75 g/kg,方差分别为 45.28,68.90,0.20,27.16;MBC、DOC、EOC 含量平均值分别为 1 540.96,156.02 和 21.84 mg/kg,方差分别为 439 155.34,81.37,3.22。在 10~20 cm 土层,SOC 和 POC、LFOC、HFOC 含量平均值分别为 65.76,6.29,0.77 和 40.77 g/kg,方差分别为

2.78,3.29,0.04,4.42;MBC、DOC、EOC 含量平均值分别为 289.90,161.10 和 10.62 mg/kg,方差分别为 9 610.14,357.34,0.41。

乔木林林下土壤 0~10 cm 土层 SOC 和 POC、LFOC、HFOC 含量平均值分别为 95.85,30.11,12.55和 58.65g/kg,方差分别为 368.16,226.36,130.21,406.91;MBC、DOC、EOC 含量平均值分别为 611.02,164.10 和 23.97 mg/kg,方差分别为 83 578.22,136.90 和 23.19;在 10~20 cm 土层,SOC、POC、LFOC、HFOC 含量平均值分别为 57.43,9.79,5.50 和 31.26 g/kg,方差分别为 423.24,19.08,6.82,57.33;MBC、DOC、EOC 含量平均值分别为 184.02,143.12 和 11.83 mg/kg,方差分别为 10 822.22,241.57 和 28.23。

表 2 色季拉山林线草甸、灌丛和乔木林土壤有机碳及其组分的统计分析

Table 2 Statistical analysis of organic carbon and its components in meadow,shrub and arbor forest in Sejila forest line

植被类型 Vegetation type	指标 Index	土层/cm Soil layer	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	方差 Variance	标准差 Standard deviation
草甸 Meadow	SOC/(g·kg ⁻¹)	0~10	80.12	50.87	66.15 Abc	215.18	14.67
		10~20	38.16	26.14	30.97 Bbc	40.27	6.35
	MBC/(mg·kg ⁻¹)	0~10	874.30	290.55	511.40 Aac	100 323.25	316.74
		10~20	94.96	74.52	84.15 Aab	105.51	10.27
	DOC/(mg·kg ⁻¹)	0~10	157.00	108.51	132.04 Aa	589.37	24.28
		10~20	162.77	106.68	126.06 Aa	1 011.60	31.81
	EOC/(mg·kg ⁻¹)	0~10	17.00	9.32	14.26 Aab	18.38	4.29
		10~20	5.05	4.01	4.68 Bab	0.33	0.57
	POC/(g·kg ⁻¹)	0~10	15.98	8.96	12.96 Aa	13.03	3.61
		10~20	10.18	3.01	5.62 Aa	15.72	3.97
	LFOC/(g·kg ⁻¹)	0~10	1.33	1.02	1.21 Aa	0.03	0.164 4
		10~20	0.62	0.30	0.43 Aac	0.03	0.17
	HFOC/(g·kg ⁻¹)	0~10	43.40	36.40	41.02 Aa	16.03	4.00
		10~20	23.08	14.02	19.57 Bbc	23.63	4.86
灌丛 Shrub	SOC/(g·kg ⁻¹)	0~10	100.51	88.58	96.34 Aa	45.28	6.73
		10~20	67.47	64.14	65.76 Ba	2.78	1.67
	MBC/(mg·kg ⁻¹)	0~10	2 292.62	1 041.00	1 540.96 Aa	439 155.34	662.69
		10~20	386.59	190.58	289.90 Ba	9 610.14	98.03
	DOC/(mg·kg ⁻¹)	0~10	163.16	145.88	156.02 Aa	81.37	9.02
		10~20	179.44	141.68	161.10 Aa	357.34	18.90
	EOC/(mg·kg ⁻¹)	0~10	23.90	20.60	21.84 Aa	3.22	1.80
		10~20	11.34	10.14	10.62 Ba	0.41	0.64
	POC/(g·kg ⁻¹)	0~10	33.62	17.08	24.94 Aa	68.90	8.30
		10~20	7.65	4.23	6.29 Ba	3.29	1.81
	LFOC/(g·kg ⁻¹)	0~10	2.34	1.45	1.93 Aa	0.20	0.449 9
		10~20	0.92	0.55	0.77 Ab	0.04	0.19
	HFOC/(g·kg ⁻¹)	0~10	67.32	56.99	61.75 Aa	27.16	5.21
		10~20	42.04	38.35	40.77 Ba	4.42	2.10
乔木林 Arbor forest	SOC/(g·kg ⁻¹)	0~10	113.38	75.35	95.85 Aa	368.16	19.19
		10~20	79.04	38.08	57.43 Ba	423.24	20.57
	MBC/(mg·kg ⁻¹)	0~10	791.70	277.59	611.02 Ab	83 578.22	289.10
		10~20	304.14	123.88	184.02 Aa	10 822.22	104.03
	DOC/(mg·kg ⁻¹)	0~10	171.49	150.61	164.10 Aa	136.90	11.70
		10~20	152.40	125.18	143.12 Aa	241.57	15.54
	EOC/(mg·kg ⁻¹)	0~10	26.88	18.41	23.97 Aa	23.19	4.82
		10~20	17.71	7.37	11.83 Ba	28.23	5.31
	POC/(g·kg ⁻¹)	0~10	41.71	13.11	30.11 Aa	226.36	15.05
		10~20	14.45	5.79	9.79 Ba	19.08	4.37
	LFOC/(g·kg ⁻¹)	0~10	25.25	3.16	12.55 Aa	130.21	11.410 9
		10~20	8.26	3.07	5.50 Aa	6.82	2.61
	HFOC/(g·kg ⁻¹)	0~10	73.70	35.73	58.65 Aa	406.91	20.17
		10~20	39.96	26.13	31.26 Ba	57.33	7.57

由表 2 中 3 种不同植被之间的平均值可知,土壤 SOC、MBC 和 HFOC 含量表现为灌丛>乔木林>草甸,且均表现为 0~10 cm 土层高于 10~20 cm 土层;土壤 EOC、POC 和 LFOC 的含量表现为乔木林>灌丛>草甸,其含量随着土层的加深而降低。乔木林的 SOC、POC、EOC 和 HFOC 含量的平均值在不同土层间有显著性差异,而 MBC、DOC 和 LFOC 含量在不同土层间无显著性差异;灌木的 SOC、POC、EOC、MBC 和 HFOC 含量在不同土层间有显著性差异,而 DOC 和 LFOC 含量在不同土层间无显著性差异;草甸的 SOC、EOC 和 HFOC 含量在不同土层间有显著性差异,而 POC、MBC、DOC 和 LFOC 含量在不同土层间无显著性差异。在 0~10 cm 土层,乔木林、灌丛和草甸的 POC、DOC、LFOC 和 HFOC 含量均无显著性差异;灌丛和草甸的 SOC 含量有显著性差异,灌丛和乔木林的 MBC 含量有显著性差异,乔木林和草甸的 SOC、EOC 和 MBC 含量有显著性差异。在 10~20 cm 土层,乔木

林、灌丛和草甸的 POC 和 DOC 含量也无显著性差异;灌木和草甸的 SOC、EOC、LFOC 和 HFOC 含量有显著性差异,乔木林和草甸的 SOC、MBC 和 HFOC 含量具有显著性差异,乔木林和灌丛的 LFOC 含量具有显著性差异。

2.3 土壤有机碳及其组分与土壤理化性质的相关性分析

2.3.1 草甸土壤 由表 3 可知,草甸土壤 SOC 与 EOC、LFOC 和 HFOC 呈显著或极显著正相关,与土壤体积质量呈显著负相关。MBC 与土壤 pH 呈显著负相关,与土壤温度呈显著正相关。DOC 与土壤电导率呈显著正相关。EOC 与 POC 呈显著正相关,与 LFOC、HFOC 呈极显著正相关,与土壤体积质量呈显著负相关。POC 与 LFOC、HFOC 呈极显著或显著正相关,与土壤体积质量呈极显著负相关。LFOC 与 HFOC 呈极显著正相关,与土壤体积质量呈极显著负相关。HFOC 与土壤含水量呈显著正相关,与土壤体积质量呈极显著负相关。

表 3 色季拉山林线草甸土壤有机碳及其组分与理化性质的相关性

Table 3 Correlation of organic carbon components and physical and chemical properties in meadow soil in Sejila forest line

指标 Index	SOC	MBC	DOC	EOC	POC	LFOC	HFOC	pH	土壤含水率 Soil water content	体积质量 Volume mass	电导率 Conduc- tivity	温度 Temper- ature
SOC	1											
MBC	0.663	1										
DOC	0.276	0.016	1									
EOC	0.971**	0.772	0.376	1								
POC	0.807	0.604	0.724	0.886*	1							
LFOC	0.908*	0.745	0.434	0.950**	0.933**	1						
HFOC	0.926**	0.768	0.353	0.948**	0.891*	0.985**	1					
pH	-0.728	-0.873*	0.233	-0.752	-0.484	-0.739	-0.753	1				
土壤含水率 Soil water content	0.808	0.640	0.317	0.799	0.717	0.762	0.850*	-0.487	1			
体积质量 Volume mass	-0.824*	-0.711	-0.459	-0.885*	-0.925**	-0.983**	-0.946**	0.715	-0.659	1		
电导率 Conductivity	0.435	0.017	0.900*	0.461	0.774	0.576	0.536	0.122	0.510	-0.591	1	
温度 Temperature	0.531	0.901*	0.094	0.677	0.606	0.720	0.672	-0.844*	0.342	-0.757	0.032	1

注: ** 表示极显著相关($P<0.01$), * 表示显著相关($P<0.05$)。下同。
Note: ** represents extremely significant correlation ($P<0.01$), * represents significant correlation ($P<0.05$). The same below.

2.3.2 灌丛土壤 由表 4 可知,灌丛土壤 SOC 与 EOC、POC、LFOC、HFOC 和电导率均呈极显著正相关,与土壤 pH 呈显著负相关。MBC 与土壤含水量呈显著正相关,与土壤体积质量呈显著负相关。DOC 与其他组分以及土壤理化性质之间未表现出显著或极显著相关性。EOC 与 POC、LFOC、HFOC 和土壤电导率呈显著或极显著正相关,与土壤 pH 呈显著负相关。POC 与土壤 pH 呈极显著负相关,

与土壤电导率、LFOC 和 HFOC 呈极显著正相关。LFOC 和 HFOC 都与土壤 pH 呈显著负相关,与土壤电导率呈极显著正相关。LFOC 和 HFOC 之间呈极显著正相关。

2.3.3 乔木林土壤 由表 5 可知,乔木林土壤 SOC 与 MBC、EOC、POC、HFOC 和土壤含水率呈显著或极显著正相关,与土壤 pH 呈极显著负相关。MBC 与 EOC、POC、HFOC 和土壤含水率呈显著或

极显著正相关,与土壤 pH 呈极显著负相关。DOC 与其他组分以及土壤理化性质之间无显著或极显著相关性。EOC 与 POC、HFOC 和土壤含水率呈显著或极显著正相关,与土壤 pH 呈极显著负相关。

POC 与 LFOC 和 HFOC 呈显著或极显著正相关,与土壤 pH 呈极显著负相关。LFOC 与土壤温度呈显著正相关,HFOC 与土壤 pH 呈极显著负相关。

表 4 色季拉山林线灌丛土壤有机碳及其组分与理化性质的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil organic carbon components and physical and chemical properties in shrub soil in Sejila forest line

指标 Index	SOC	MBC	DOC	EOC	POC	LFOC	HFOC	pH	土壤含水率 Soil water content	体积质量 Volume mass	电导率 Conduc- tivity	温度 Temper- ature
SOC	1											
MBC	0.696	1										
DOC	-0.046	-0.430	1									
EOC	0.981**	0.794	-0.130	1								
POC	0.952**	0.593	-0.043	0.952**	1							
LFOC	0.966**	0.598	-0.022	0.953**	0.991**	1						
HFOC	0.985**	0.711	-0.038	0.988**	0.966**	0.958**	1					
pH	-0.903*	-0.626	0.375	-0.901*	-0.924**	-0.912*	-0.899*	1				
土壤含水率 Soil water content	0.698	0.847*	-0.506	0.769	0.668	0.706	0.662	-0.718	1			
体积质量 Volume mass	-0.454	-0.820*	-0.035	-0.554	-0.334	-0.360	-0.475	0.187	-0.602	1		
电导率 Conductivity	0.933**	0.482	-0.031	0.905*	0.986**	0.981**	0.932**	-0.931**	0.605	-0.189	1	
温度 Temperature	-0.473	-0.542	0.682	-0.573	-0.600	-0.522	-0.551	0.751	-0.558	0.071	-0.567	1

表 5 色季拉山林线乔木林土壤有机碳及其组分与理化性质的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of soil organic carbon components and physical and chemical properties in arboreal forest soil in Sejila forest line

指标 Index	SOC	MBC	DOC	EOC	POC	LFOC	HFOC	pH	土壤含水率 Soil water content	体积质量 Volume mass	电导率 Conduct- ivity	温度 Temper- ature
SOC	1											
MBC	0.920**	1										
DOC	0.109	0.265	1									
EOC	0.979**	0.949**	0.242	1								
POC	0.890*	0.991**	0.307	0.932**	1							
LFOC	0.596	0.782	0.284	0.703	0.847*	1						
HFOC	0.932**	0.989**	0.178	0.936**	0.964**	0.696	1					
pH	-0.943**	-0.979**	-0.144	-0.955**	-0.945**	-0.689	-0.989**	1				
土壤含水率 Soil water content	0.938**	0.836*	-0.144	0.906*	0.778	0.501	0.871*	-0.919**	1			
体积质量 Volume mass	-0.775	-0.526	0.181	-0.663	-0.515	-0.239	-0.561	0.545	-0.679	1		
电导率 Conductivity	0.265	0.250	0.742	0.384	0.323	0.438	0.132	-0.139	0.031	-0.205	1	
温度 Temperature	0.326	0.496	0.260	0.489	0.545	0.835*	0.389	-0.452	0.351	0.105	0.464	1

3 讨 论

3.1 不同植被下土壤有机碳及其组分的分布特征

土壤、植被、气候和人为活动等都会影响土壤有机碳含量^[22-23]。本研究表明,西藏色季拉山林线附近草甸、灌丛和乔木林 3 种典型植被土壤的有机碳及其组分含量具有一定差异性,其中草甸土壤有机

碳及其组分含量相对较低,灌丛土壤相对较高。有机碳含量受植被归还量和分解速率的影响,灌丛下的凋落物数量多,分解速率慢,土壤有机碳积累较多。不同植被地下根系碳氮含量、根系分布、根系分泌物以及 与土壤养分之间的交互作用、有机质矿化或者迁移的差异,都会导致土壤有机碳含量的差异^[24]。乔木林和灌丛林水源涵养功能较草甸强,凋

落物和根系分泌物也较草甸多,有机碳含量相应较草甸高。在本研究中,乔木林土壤有机碳含量低于灌丛林。而陈心桐等^[25]研究表明,森林土壤的有机碳含量最大,其次是灌丛林和草地。出现差异的原因可能是因为研究区森林植被丰富度更高,包含的植被类型更多,凋落物与根系分泌物也相应增加且成分更为复杂。灌丛林的微生物量碳含量与乔木林和草甸区的微生物碳含量具有显著差异,说明微生物量碳含量除了与有机碳含量有关外,还与植被的覆盖度、植物根系和凋落物量等有关,灌丛林的植被覆盖度高,土壤湿度和腐殖质促进了微生物的生长和繁殖。李忠武等^[26]研究发现,在植物根系较多、覆盖度高且土壤温度和水分适宜的条件下,有利于微生物量碳的积累。陈晓琳等^[27]的研究也表明,植物根系分布和分泌物会影响轻组有机碳的含量。

3.2 不同土层土壤有机碳及其组分的分布特征

本研究发现,在色季拉山林线附近 3 种典型植被下,除灌丛可溶性有机碳以 10~20 cm 土层略高于 0~10 cm 土层外,其余土壤有机碳及其组分含量均以 0~10 cm 土层高于 10~20 cm 土层,表明大部分土壤有机碳及其组分具有表聚性特征,这与杨满元等^[28]、董扬红等^[29]的研究结果一致。王棣等^[30]对秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征的研究表明,可溶性有机碳含量随着土层的加深而降低。这与本研究的结论不同,可能是本研究在采样时土壤表层枯枝落叶较少,之前积累的腐殖质进入到土壤深层所致。有研究表明,地上植物的生物量大约有一半以上聚集在土壤表层,土壤表层还聚集了凋落物以及腐殖质,这些都会影响到有机碳的积累,导致有机碳含量在土壤表层最高,随着土层的加深含量减少^[31]。另外,土壤表层的微生物活动较底层微生物活动强烈,在分解有机质方面更加容易,从而导致有机碳含量增加^[32-33]。不同植被类型下,有机碳储量及其垂直分布格局受土壤剖面有机碳含量和土壤密度的共同影响,因此土壤有机碳的垂直分布格局与含量具有相似性,但也有一些差异。黄从德等^[34]的研究也表明,在垂直分布上有机碳含量随着土层的加深而降低。

3.3 不同植被下土壤有机碳组分的相关性

本研究中,色季拉山林线附近 3 种典型植被下,土壤 SOC 均与 DOC 不相关,与 EOC 和 HFOC 均呈极显著正相关关系。另外,草甸的 SOC 与 LFOC 呈显著正相关关系,灌丛的 SOC 与 POC 和 LFOC 呈极显著正相关关系,乔木林的 SOC 与 POC 和

MBC 呈显著或极显著正相关关系,说明土壤有机碳组分的含量在很大程度上取决于 SOC 的贮量。胡玉福等^[35]和杜满义等^[36]的研究均表明,土壤有机碳与微生物量碳呈正相关。刘梦云等^[37]的研究表明,颗粒有机碳与轻组有机碳、可溶性有机碳与易氧化有机碳之间的相关性大于其他组分。侯翠翠等^[38]的研究也表明,轻组有机碳与有机碳呈正相关。这些结果均与本研究结论相似。

4 结 论

土壤有机碳含量与植被类型有关。西藏色季拉山林线附近草甸、灌丛和乔木林 3 种典型植被土壤的 SOC、MBC 和 HFOC 含量表现为灌丛>乔木林>草甸,EOC、POC 和 LFOC 的含量表现为乔木林>灌丛>草甸,3 种植被下以草甸土壤的有机碳及其组分含量最低。除灌丛土壤的 DOC 含量以 0~10 cm 土层低于 10~20 cm 土层外,3 种植被土壤 0~10 cm 土层的有机碳及其余组分含量均高于 10~20 cm 土层,其分布表现出明显的表聚性。草甸、灌丛和乔木林的 SOC 与 EOC 和 HFOC 含量均呈极显著正相关,EOC 与 POC、HFOC 含量以及 POC 与 LFOC 含量均呈显著或极显著正相关。

[参考文献]

- [1] 刘魏魏,王效科,逯 非,等. 全球森林生态系统碳储量、固碳能力估算及其区域特征 [J]. 应用生态学报,2015,26(9):2881-2890.
Liu W W, Wang X K, Lu F, et al. Regional and global estimates of carbon stocks and carbon sequestration capacity in forest ecosystems: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2881-2890.
- [2] Zhang G Q, Zhang P, Cao Y. Ecosystem carbon and nitrogen storage following farmland afforestation with black locust (*Robinia pseudoacacia*) on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29(3): 761-771.
- [3] 席梅竹,赵中秋,白中科,等. 露天煤矿区复垦土壤碳库研究进展 [J]. 土壤通报,2019,50(3):748-756.
Xi M Z, Zhao Z Q, Bai Z K, et al. A review on soil carbon sequestration in reclaimed opencast coal mine [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(3): 748-756.
- [4] Tong Y Y, Wang J F, Zhu Z K, et al. Characterization of soil organic carbon mineralization under different gradient carbon loading in paddy soil [J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1483-1490.
- [5] 高 雨,赵洪涛,郭银花,等. 山西太岳山不同林龄油松林土壤有机碳稳定性的变化特征 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(10): 1-10.
Gao Y, Zhao H T, Guo Y H, et al. Stability of soil organic carbon

- bon changed with forest age in *Pinus tabulaeformis* plantations in Mt. Taiyue, Shanxi [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(10): 1-10.
- [6] Liu R, Ma T, Qiu W K, et al. The environmental functions and ecological effects of organic carbon in silt [J]. Journal of Earth Science, 2020, 31(4): 834-844.
- [7] 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, 33(3): 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, 33(3): 39-44.
- [8] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1839-1850.
Hu H Q, Luo S S, Luo B Z, et al. Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon in forest ecosystems: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1839-1850.
- [9] 杜 虎, 曾馥平, 宋同清, 等. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 282-291.
Du H, Zeng F P, Song T Q, et al. Spatial pattern of soil organic carbon of the main forest soils and its influencing factors in Guangxi, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(4): 282-291.
- [10] 周晨霓, 马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征 [J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1246-1251.
Zhou C N, Ma H P. Distribution of labile organic carbon in soil as affected by vegetation typical of sygera mountains, Tibet, China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(6): 1246-1251.
- [11] 周晨霓, 任德智, 马和平, 等. 西藏色季拉山两种典型天然林分土壤活性有机碳组分与土壤呼吸特征研究 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 557-563.
Zhou C N, Ren D Z, Ma H P, et al. Analysis of the active organic carbon components and soil respiration characteristics from two typical natural forests in Sygara mountains, Tibet, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(2): 557-563.
- [12] 东 主, 李瑛萍, 石玉龙, 等. 色季拉山不同海拔土壤可溶性有机碳与养分分布特征及影响因素研究 [J]. 高原农业, 2019, 3(6): 587-596, 605.
Dong Z, Li Y P, Shi Y L, et al. Study on distribution characteristics and influencing factors of soil dissolved organic carbon and nutrients at different altitudes in Sygera Mountain [J]. Journal of Plateau Agriculture, 2019, 3(6): 587-596, 605.
- [13] 袁 敏, 屈兴乐, 赵津仪, 等. 山区高寒草甸东西坡土壤有机碳及组分差异 [J]. 贵州农业科学, 2020, 48(12): 57-61.
Yuan M, Qu X L, Zhao J Y, et al. Differences of soil organic carbon and its components between east and west slopes of alpine meadow [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2020, 48(12): 57-61.
- [14] 曹舰艇, 杨 红, 崔在忠, 等. 藏东南色季拉山东西坡不同海拔高度土壤养分含量分布特征 [J]. 高原农业, 2019, 3(1): 19-27, 35.
- [15] 任毅华, 罗大庆, 方江平, 等. 色季拉山急尖长苞冷杉林下灌丛群落空间格局及其与倒木关联性分析 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 60-65.
Ren Y H, Luo D Q, Fang J P, et al. Spatial pattern of shrub community and its correlation with fallen logs in *Abies georgei* var. *smithii* forests in the Sejila Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 60-65.
- [16] 王瑞红, 潘 刚, 张新军, 等. 色季拉山急尖长苞冷杉幼苗天然更新的影响因子研究 [J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(3): 652-658.
Wang R H, Pan G, Zhang X J, et al. Natural regeneration factors of *Abies georgei* var. *smithii* seedlings in Sejila Mountain [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, 38(3): 652-658.
- [17] 高 郟, 权 红, 卢 杰, 等. 藏东南高山松林表层土壤养分含量及其化学计量比特征 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 62-70, 80.
Gao T, Quan H, Lu J, et al. Characteristics of topsoil nutrients and their stoichiometry in *Pinus densata* forest in southeast Tibet [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(4): 62-70, 80.
- [18] 郭文文, 卓么草, 何 竹, 等. 藏东南色季拉山不同海拔川滇高山栎叶解剖结构及环境适应性 [J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2022, 42(6): 1-6.
Guo W W, Zhuo M C, He Z, et al. Anatomical characteristics and environmental adaptability of *Quercus aquifolioides* leaf in Sejila Mountain, southeastern Tibet [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science Edition), 2022, 42(6): 1-6.
- [19] 郭 焱, 于红博. 土壤含水量测定方法综述 [J]. 内蒙古科技与经济, 2018(3): 66-67.
Guo T, Yu H B, Review of soil moisture determination methods [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2018(3): 66-67.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Bao S D. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [21] 张方方, 岳善超, 李世清. 土壤有机碳组分化学测定方法及碳指数研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 252-259.
Zhang F F, Yue S C, Li S Q. Chemical methods to determine soil organic carbon fractions and carbon indexes: a review [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(2): 252-259.
- [22] 崔永琴, 马剑英, 刘小宁, 等. 人类活动对土壤有机碳库的影响研究进展 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 407-414.
Cui Y Q, Ma J Y, Liu X N, et al. Effects of human activities on soil organic carbon pool [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 407-414.

[23] 王春燕,何念鹏,吕瑜良. 中国东部森林土壤有机碳组分的纬度格局及其影响因子 [J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3176-3188.
Wang C Y, He N P, Lv Y L. Latitudinal patterns and factors affecting different soil organic carbon fractions in the eastern forests of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3176-3188.

[24] Liu L, Wang H Y, Dai W. Characteristics of soil organic carbon mineralization and influence factor analysis of natural *Larix olgensis* forest at different ages [J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(4): 1495-1506.

[25] 陈心桐,徐天乐,李雪静,等. 中国北方自然生态系统土壤有机碳含量及其影响因素 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1133-1140.
Cheng X T, Xu T L, Li X J, et al. Soil organic carbon concentrations and the influencing factors in natural ecosystems of northern China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(4): 1133-1140.

[26] 李忠武,郭 旺,申卫平,等. 红壤丘陵区不同地类活性有机碳分布特征及与草本生物量关系 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(3): 76-82.
Li Z W, Guo W, Shen W P, et al. Effect of land use type on the distribution labile organic carbon and its relationship to herb biomass in red soil hilly region [J]. Journal of Hunan University (Natural Science edition), 2013, 40(3): 76-82.

[27] 陈晓琳,李忠武,王晓燕,等. 中亚热带红壤丘陵区松林生态系统表层土壤活性有机碳空间分异规律 [J]. 地理研究, 2011, 30(10): 1825-1834.
Chen X L, Li Z W, Wang X Y, et al. Spatial distribution of topsoil labile organic carbon of *Pinus elliottii* ecosystem in the central subtropical region [J]. Geographical Research, 2011, 30(10): 1825-1834.

[28] 杨满元,杨 宁. 紫色土丘陵坡地不同植被类型土壤活性有机碳组分的比较 [J]. 草地学报, 2018, 26(2): 380-385.
Yang M Y, Yang N. Comparison of soil active organic carbon components between different vegetation types on sloping land of purple soil [J]. Acta Agrectir Sinica, 2018, 26(2): 380-385.

[29] 董扬红,曾全超,李娅芸,等. 黄土高原不同植被类型土壤活性有机碳组分分布特征 [J]. 草地学报, 2015, 23(2): 277-284.
Dong Y H, Zeng Q C, Li Y Y, et al. The characteristics of soil active organic carbon composition under different vegetation types on the Loess Plateau [J]. Acta Agrectir Sinica, 2015, 23(2): 277-284.

[30] 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 for-est types in the Qinling Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1569-1577.

[31] Chen F, Xia H, Qin X J. Effect of mixture sowing on biomass allocation in the artificially-planted pastures, Southeastern Tibetian [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(1): 54-63.

[32] Zhao S X, Yu X L, Li Z H, et al. Effects of biochar pyrolyzed at varying temperatures on soil organic carbon and its components; influence on the soil active organic carbon [J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 769-782

[33] Zhang W W, Han H R, Cheng X Q, et al. Effects of thinning on soil active organic carbon contents and enzyme activities in *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. The Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3347-3355.

[34] 黄从德,张 健,杨万勤,等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
Huang C D, Zhang J, Yang W Q. et al. Spatial distribution characteristics of forest soil organic carbon stock in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1217-1225.

[35] 胡玉福,彭佳佳,蒋双龙,等. 川中丘陵区不同土地利用方式土壤活性有机碳含量特征研究 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 221-225, 231.
Hu Y F, Peng J J, Jiang S L, et al. Study on soil active organic carbon in different land use patterns of the middle Sichuan region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 221-225, 231.

[36] 杜满义,范少辉,漆良华,等. 不同类型毛竹林土壤活性有机碳 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 571-576.
Du M Y, Fan S H, Qi L H, et al. Soil labile organic carbon in different types of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) stands [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3): 571-576.

[37] 刘梦云,常庆瑞,齐雁冰,等. 黄土台塬不同林分结构土壤有机碳质量分数特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1418-1427.
Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B, et al. Soil organic carbon under different planting structures on the tablelands of Loess Plateau [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1418-1427.

[38] 侯翠翠,宋长春,李英臣,等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态 [J]. 环境科学, 2011, 32(1): 290-297.
Hou C C, Song C C, Li Y C, et al. Seasonal dynamics of soil organic carbon and active organic carbon fractions in *Calamagrostis angustifolia* wetlands topsoil under different water conditions [J]. Environmental Science, 2011, 32(1): 290-297.