

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.10.002

郭璐璐, 李安迪, 商宏莉, 等. 川西贡嘎山不同森林生态系统土壤有机碳垂直分布与组成特征[J]. 中国农业气象, 2018, 39(10): 636–643

川西贡嘎山不同森林生态系统土壤有机碳垂直分布与组成特征*

郭璐璐^{1,2}, 李安迪², 商宏莉^{1**}, 孙守琴^{2**}

(1. 四川师范大学生命科学学院, 成都 610000; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程和生态调控重点实验室, 成都 610041)

摘要: 通过野外采样与室内实验相结合的方法, 对川西典型亚高山不同海拔处暗针叶林、针阔混交林和常绿-落叶阔叶林 3 种森林类型表层土壤总有机碳 (SOC) 和活性有机碳的含量特征进行分析, 旨在为亚高山生态系统土壤碳循环研究提供理论和数据支撑。结果表明: 3 种森林类型土壤中总有机碳含量 (SOC) 在 44.21~179.98 g·kg⁻¹, 表层 (0–15 cm) SOC 含量大小顺序为针阔混交林>常绿-落叶阔叶林>暗针叶林, 0–5 cm 土层 SOC 含量与活性有机碳含量均高于 5–15 cm 土层, 说明土壤有机碳具有土壤表聚现象。3 种森林类型间 SOC 密度差异不显著, 但不同森林类型土壤 SOC 密度沿土层的分布具有差别: 与常绿-落叶阔叶林和暗针叶林相比, 针阔混交林 5–15 cm 土层 SOC 密度较高。土壤溶解性有机碳 (DOC)、轻组分有机碳 (LFOC) 和微生物 (MBC) 含量均以针阔混交林最高, 但其相对于 SOC 的比例则以暗针叶林最高, 说明高海拔生态系统土壤活性有机碳有更大的累积, 同时也暗示在气候变化背景下, 高海拔生态系统可能具有更大的 CO₂ 排放风险。

关键词: 土壤有机碳; 活性有机碳; 森林类型; 亚高山

Total and Labile Organic Carbon in Soils of Three Subalpine Forest Types in Gongga Mountain, Western Sichuan

GUO Lu-lu^{1,2}, LI An-di², SHANG Hong-li¹, SUN Shou-qin²

(1. College of Life Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China; 2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041)

Abstract: In this study the concentration and distribution of soil organic carbon (SOC), as well as the labile SOC in soil of three forest types including an evergreen-deciduous broad-leaved forest, a mixed broadleaf-coniferous forest and a subalpine dark coniferous forest were investigated in western Sichuan, China. Results indicated that SOC concentration in the surface soil (0–15 cm) across three forest types was 44.21–179.98 g·kg⁻¹, with the highest value in the mixed broadleaf-coniferous forest, followed by the evergreen-deciduous broad-leaved forest, and then the coniferous forest. In all of the three forests the soil of 0–5 cm layer relative to that of 5–15 cm layer had a higher SOC concentration, indicating a surface gathering characteristic of SOC in the forests. The SOC density did not differ among the three forests, while significant differences in light of the vertical variation of SOC density along soil depth were detected among the three forests, where the mixed broadleaf-conifer forest compared to the other two forests had a higher SOC density in the 5–15 cm soil depth. Although the concentrations of dissolved organic carbon (DOC), light fraction organic carbon (LFOC) and microbial biomass carbon (MBC) were highest in the mixed broadleaf-conifer forest, the coniferous forest among the three forests was highest in the ratios of these parameters to total SOC content, indicating a higher accumulation of labile SOC in forest with a higher elevation. The results

* 收稿日期: 2018-04-04

** 通讯作者。E-mail: csshongli@yeah.net; shouqinsun@imde.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41473078)

作者简介: 郭璐璐 (1991–), 女, 硕士生, 主要研究方向为生态学。E-mail: xyguolu@126.com

suggest that ecosystem with a higher elevation may have a higher risk of CO₂ emission under the circumstance of the climate warming.

Key words: Organic carbon content; Carbon storage; Microbial biomass carbon; Labile organic carbon

土壤是陆地生态系统中最大也是最活跃的碳库^[1]。森林土壤有机碳(SOC)的积累和分解影响着土壤有机碳库的时空变化,直接或间接影响陆地生物碳库和全球碳平衡^[2-3]。土壤活性有机碳作为土壤中最容易被分解和矿化,同时也最容易被微生物和植物利用的那部分碳,在生态系统碳平衡中起着至关重要的作用^[4]。

关于森林土壤有机碳累积、组成及在不同类型森林间的差异已有大量研究报道。梁启鹏等^[5]通过测定土壤剖面有机碳含量与密度,得出不同林分类型显著影响土壤有机碳含量与密度;秦纪洪等^[6]通过对不同海拔梯度土壤活性组分有机碳的研究发现,高海拔土壤更有利于土壤活性有机碳的累积;Zinn等^[7]通过研究巴西热带森林不同海拔土壤有机碳含量,指出海拔是影响土壤有机碳含量的综合和主导因素。但这些工作多在分散于不同区域的植被类型间进行。由于植被覆盖类型、环境条件等生物和非生物因素的综合影响,加上森林土壤的空间异质性和时间变化的复杂性,对不同地区和不同森林植被类型土壤有机碳储量的估算还存在较大的差异性和不确定性。特别是,随着海拔高度的变化,高山生态系统植被组成、结构、土壤温度、水分、养分、有机质分解、微生物活性以及土壤动物等一系列因子均会发生变化^[8-10],使得其土壤碳库特别是活性有机碳状况会存在很大差异。研究同一地区不同海拔高度的土壤各活性有机碳库的含量与分布对揭示区域植被土壤碳循环规律具有重要意义。

川西亚高山森林是中国第二大林区,在长江上游生态安全屏障及生态系统功能维持中起着重要作用,同时高大山体形成的垂直带谱为研究生态系统过程随植被类型变化的空间异质性提供了良好的基地。贡嘎山是川西和青藏高原东南缘高山-亚高山生态系统的典型代表,也是研究高山-亚高山生态系统碳循环对气候变化的响应及其在不同植被类型间的分异的代表性区域。然而对该区山地垂直带生态系统土壤有机碳的性质和空间变异特征的认识还十分有限。为此,本研究以贡嘎山高山生态系统为研究对象,在小尺度范围

内阐释山地垂直带生态系统土壤有机碳累积、组成及随植被类型的空间变异特征,以期为川西地区高山生态系统碳循环研究提供一定的积累,为长江上游高山生态系统管理和生态环境建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于四川省甘孜藏族自治州贡嘎山(29°20'N-30°20'N, 101°30'E-102°15'E),该山主峰海拔 7556m,是横断山系最高峰。在贡嘎山东坡海螺沟 28km 的水平距离上,相对高差达 6400m,从低海拔到高海拔,植被分布有以常绿-落叶阔叶混交林、针阔混交林、暗针叶林为主体的 7 个植被类型,由于低海拔森林类型受人为活动干扰程度相对较高,高海拔区域以草甸为主,本研究选择该地具有代表性中低海拔的常绿-落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林 3 个森林类型为研究对象。该区域夏季雨量大且集中,空气相对湿度大;冬季气候寒冷,相对干燥;年均气温 4.8℃,年均降水量和空气相对湿度分别为 1960mm 和 94%。

1.2 样地设置与样品采集

川西贡嘎山中下部森林生态系统从低海拔到高海拔区域土层相对都较瘠薄,土壤有机碳主要集中在表层^[11],因此本研究也以表层土壤为研究对象。在贡嘎山海拔 2000-3600m 范围内,按海拔由低到高分别在常绿落叶阔叶林(DF)、针阔混交林(CF)和暗针叶林(SF) 3 个主要森林类型中设置样地(表 1),样地大小 30m×30m,每个森林类型设置 3 块样地,同一森林类型不同样地间距离 50m 以上。于 2017 年 4 月在每块样地内随机选择 8 个位置,分层采集 0-5cm、5-15cm 土壤样品,按土层分别形成一个混合样;同时用环刀(100cm³)分层采集 0-5cm 和 5-15cm 土样,用于测定容重和砾石含量。样品采集后于 4℃保存,带回实验室,去除根系等杂物后混匀,过 2mm 筛。一部分风干,用于 pH、土壤 SOC 含量的测定;其余放入 4℃冰箱保存,用于土壤溶解性有机碳(DOC)、轻组有机碳(LFOC)和微生物量碳(MBC)含量等的测定。

表 1 样地概况
Table 1 Information of the sampling sites

森林类型 Forest type	土壤类型 Soil type	郁闭度 Canopy density	海拔 Elevation (m)	主要物种 Main plant species
常绿-落叶阔叶林 Evergreen deciduous broad-leaved forest (DF)	山地黄壤 Mountain yellow soil	0.8~0.9	2000~2250	包瓣柯 <i>Lithocarpus cleistocarpus</i> , 冬瓜杨 <i>Populus purdomii</i> var. <i>purdomii</i> , 大叶杨 <i>Populus lasiocarpa</i> , 槭树 <i>Acer serrulatum</i>
针阔混交林 Coniferous and broadleaf mixed forest (CF)	山地黄棕壤 Mountain yellow brown soil	0.7~0.8	2400~2800	麦吊云杉 <i>Picea brachytyla</i> , 峨眉冷杉 <i>Abies fabri</i> , 糙皮桦 <i>Betula albo-sinensis</i>
暗针叶林 Dark coniferous forests (SF)	山地暗棕壤 Mountain dark brown soil	0.4~0.7	2800~3600	峨眉冷杉 <i>A. fabri</i>

1.3 样品分析方法

土壤 pH 值采用电极电位法测定 (土水比为 1:2.5)。土壤容重采用环刀采集原状土后经烘干法测定^[12]。砾石含量通过环刀内土样的全部砾石 (粒径 > 2mm) 与环刀内全部土样的百分比计算。土壤总有机碳 (TOC, g·kg⁻¹) 用元素分析仪 (various MACRO cube, 德国) 测定。溶解性有机碳 (DOC) 采用去离子水浸提^[13], TOC 分析仪 (acquray TOC, 德国) 测定。微生物量碳 (MBC) 采用氯仿熏蒸浸提法 (FE)^[14], TOC 分析仪 (acquray TOC, 德国) 测定。轻组分有机碳 (LFOC) 采用 NaI 重液分离^[15-16], 元素分析仪 (various MACRO cube, 德国) 测定。土壤有机碳密度根据所测土壤有机碳含量和容重计算^[17], 即

$$\text{SOC density} = C \times \theta \times D \times (1 - \delta) / 100$$

式中, C 为土壤总有机碳的平均含量 (g·kg⁻¹); D 为土层厚度 (cm), 本研究为 5cm 和 10cm; θ 为土壤容重 (g·cm⁻³), δ 为砾石含量 (体积百分数)。

1.4 数据处理

采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 和 Tukey 检验分析样本间的差异及其显著性, 统计分析均采用 SPSS 18.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 森林生态系统土壤有机碳垂直分布特征

由表 2 可见, 3 种森林类型土壤容重介于 0.63~

1.07g·cm⁻³ 之间, 同一林型中下层土壤容重相对更大。3 种林型土壤总有机碳含量 (SOC) 介于 44.21~179.98g·kg⁻¹ 之间, 不同类型森林数据差异较大, 最大值约为最小值的 4 倍; 但总体上 0~5cm 土层相对于 5~15cm 土层 SOC 含量较高。不同森林类型土壤 SOC 密度沿土层的分布具有明显差别, 但无论是何种林型, 其 5~15cm 土层 SOC 密度均显著高于 0~5cm 土层。

仔细分析对比 3 种森林类型下土壤特征值可见, 随着海拔由低到高, 常绿落叶阔叶林 (DF) 土壤酸性较弱、容重较大, 暗针叶林 (SF) 土壤酸性最强、容重最大, 针阔混交林 (CF) 土壤酸性居中、容重最小。相应地, 3 种森林类型土壤 SOC 含量也具有明显差异 ($F = 13.22$, $P < 0.05$)。针阔混交林 (CF) 在 0~5cm 和 5~15cm 土层 SOC 含量均最高, 分别达到 179.98g·kg⁻¹ 和 117.97g·kg⁻¹, 是其它两种类型的 2 倍左右, 且 0~5cm 土层 SOC 含量明显高于 5~15cm 土层; 其它两种森林类型土壤 SOC 含量相对较小, 且差异不显著, 但同样表现出 0~5cm 表层高于 5~15cm 土层的特征。与 SOC 含量相似, 针阔混交林与阔叶林和暗针叶林相比其 0~5cm 和 5~15cm 土层有机碳密度也明显较高 ($P < 0.05$), 分别为 0.58kg·m⁻² 和 0.80kg·m⁻²。3 种森林类型间土壤有机碳含量和密度的显著差异, 说明川西贡嘎山中下部地区, 森林类型对土壤性状有明显影响。

表 2 不同森林类型表层土壤有机碳含量与有机碳密度（平均值±标准差）

Table 2 Concentration and density of organic carbon in the 0–5cm and 5–15cm depth of soil in the three types of forests (mean ±SE)

土层	森林类型	pH	容重	有机碳含量	有机碳密度
Soil depth	Forest type		Bulk density (g·cm ⁻³)	Total organic carbon concentration (g·kg ⁻¹)	Organic carbon density (kg·m ⁻²)
0–5cm	DF	4.94	0.81a	95.99±14.96bc	0.35±0.09a
	CF	4.68	0.63a	179.98±21.48a	0.58±0.29a
	SF	4.46	0.78a	99.66±17.31b	0.31±0.07a
5–15cm	DF	5.21	0.86ab	60.00±11.16b	0.45±0.05a
	CF	5.05	0.66b	117.97±40.74a	0.80±0.37a
	SF	4.99	1.07a	44.21±12.26bc	0.36±0.12b

注：DF：常绿–落叶阔叶林；CF：针阔混交林；SF：暗针叶林。小写字母表示不同森林类型间在 0.05 水平上的差异显著性。下同。
Note: DF:evergreen-deciduous broad-leaved forest; CF:coniferous and broadleaf mixed forest; SF:dark coniferous forest.Different small letters indicate the significant difference among forests at 0.05 level. The same as below.

2.2 森林生态系统土壤有机碳组成特征

2.2.1 各种有机碳组分含量

由图 1 可见，无论是哪一类型森林，0–5cm 土层与 5–15cm 土层相比其土壤活性有机碳含量均明显较高。3 种类型森林中，常绿–落叶阔叶林、针阔混交林和暗针叶林 0–5cm 土层 MBC 含量分别为相应植被类型 5–15cm 土层 MBC 含量的 1.43 倍、2.89 倍和 1.88 倍。相反，不同土层 DOC 和 LFOC 含量仅在针阔混交林表现出了区别，常绿–落叶阔叶林和暗

针叶林 DOC 和 LFOC 含量在 0–5cm 和 5–15cm 土层之间均无显著差异。

对比分析 3 种森林类型 0–5cm 和 5–15cm 土层活性有机碳发现，针阔混交林 0–5cm 土层 DOC、LFOC 和 MBC 含量均显著高于其它两种森林类型 (P<0.05)。3 种森林类型 5–15cm 土层 DOC 和 MBC 含量无显著性差异，但针阔混交林与其它两种森林类型相比其 5–15cm 土层 LFOC 含量明显较高。

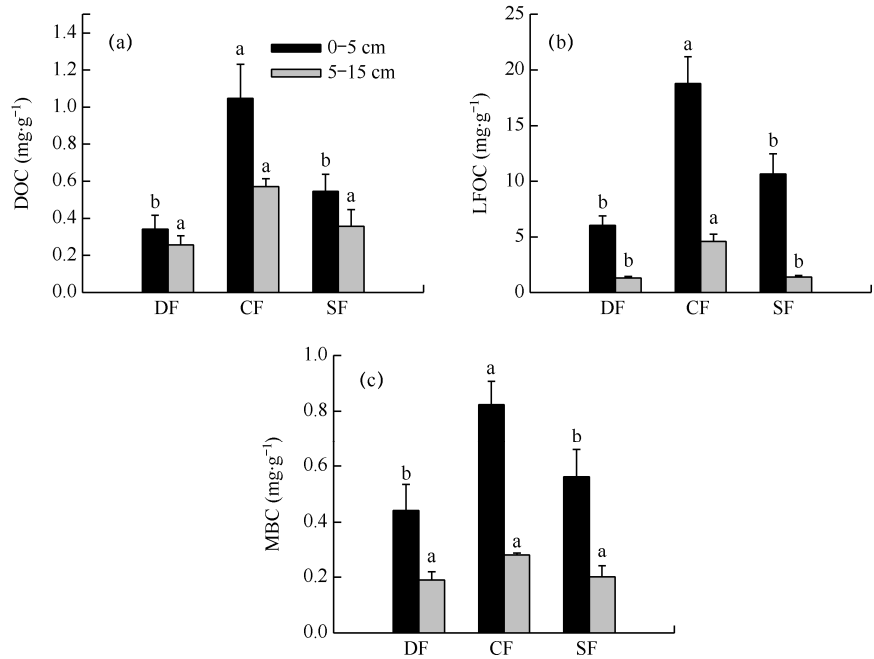


图 1 不同森林类型表层土壤活性有机碳组分含量

Fig. 1 Concentrations of active organic carbons in the 0–5cm and 5–15cm layers of soils in the three forest types

注：DOC：溶解性有机碳；LFOC：轻组分有机碳；MBC：微生物量碳。
Note: DOC: dissolved organic carbon; LFOC: Light fraction organic carbon; MBC: microbial biomass carbon.

2.2.2 各种有机碳组分比例

由表 3 可知, DOC、LFOC 和 MBC 占总有机碳的比例分别为 0.78%~0.90%、4.71%~8.36%和 0.37%~0.48%。3 种森林类型中, 暗针叶林 DOC 和 LFOC 占

总有机碳的比例最高, 常绿-落叶阔叶林的比例最低; 土壤 MBC 占总有机碳的比例在暗针叶林最高, 针阔混交林最低。不同森林类型土壤 0-5cm 和 5-15cm 土层活性有机碳占总有机碳的比例无明显差异。

表 3 不同森林类型土壤活性有机碳占总有机碳的比例

Table 3 Ratios of labile organic carbon relative to total organic carbon in soils of the three forest types

森林类型	土层	溶解性有机碳	微生物量碳	轻组分有机碳
Forest type	Soil depth (cm)	Dissolved organic carbon (%)	Microbial biomass carbon (%)	Light fraction organic carbon (%)
DF	0-15	0.78	0.44	4.71
CF	0-15	0.87	0.37	7.85
SF	0-15	0.90	0.48	8.36

3 结论与讨论

3.1 讨论

本研究涉及的 3 种森林类型表层土壤有机碳含量介于 143.87~297.95g·kg⁻¹ 之间, 高于肖安旭等^[18]对川西卧龙自然保护区同海拔范围内森林土壤有机碳含量的报道; 但土壤有机碳密度则低于肖安序^[18]报道的结果。这说明贡嘎山高山生态系统土壤发育程度可能更高, 因此土壤具有较大的有机碳累积; 但由于贡嘎山高山生态系统土壤具有较高的砾石含量, 同时该区土壤在植物根系的作用下其质地更为疏松^[19], 因此土壤有机碳密度并不大。与马明东等^[20]对卧龙几种不同森林类型土壤碳密度的研究结果相似, 本研究涉及的 3 种森林类型表层土壤有机碳(SOC)密度存在显著差异, 且其沿土层的分布也具有一定差别。针阔混交林与常绿-落叶阔叶林和暗针叶林相比其 5-15cm 土层具有较高的有机碳密度, 反映了针阔混交林土壤有机碳有较大的向下迁移和沉积的特点。

肖安序等^[18-21]报道, 随着海拔的升高, SOC 含量和密度均逐渐增加, 本研究未观察到这一变化趋势。相反, 位于中等海拔高度的针阔混交林与常绿-落叶阔叶林和暗针叶林相比具有较高的 SOC 含量和密度, 这可能是因为针阔混交林与其它两种森林类型相比其土壤砾石含量相对较少所致^[22]。该结果体现了森林类型对 SOC 的影响^[23], 说明森林类型与海拔相比前者更能有效反映土壤有机碳的空间变异。此外, 一些研究报道森林土壤有机碳含量和密度随土层深度的增加而降低^[24]。与之相似, 本研究涉及的 3 种森林类型中, 0-5cm 土层有机碳含量均明显高于 5-15cm 土层, 土壤 SOC 密度随土壤厚度的增

加也呈下降趋势, 这是因为表层土壤为植物根系主要集中在分布区, 同时也是最容易受到凋落物和腐殖质层影响的区域, 因而更容易累积有机碳。

土壤 SOC 是土壤有机质的一种化学量度, 土壤有机碳占土壤有机质的 60%~80%。土壤有机碳中有些组分对土地利用方式等因子变化的反应比总有机碳更敏感, 这部分碳被称为活性有机碳, 可作为有机碳早期变化的指示物, 而非活性有机碳则表征土壤长期积累和固碳能力, 活性有机碳可用 DOC、LFOC、MBC 等来表征。3 种森林类型表层土壤 DOC 含量范围为 1.21~2.58g·kg⁻¹, 与万忠梅等^[25-26]的研究结果相似。此外, 与卢慧等^[27]对神农架亚高山生态系统的研究相一致, 贡嘎山亚高山生态系统土壤 DOC 并没有明显的海拔分布特征。相反, 针阔混交林与常绿-落叶阔叶林和针叶林相比, 其 DOC 含量最高。随着海拔升高, DOC/SOC 比值增大, 暗针叶林与另两种类型植被相比具有更大的 DOC/SOC 比值, 说明亚高山暗针叶林土壤常年低温、雨量大的气候条件更有利于土壤 DOC 的累积^[28], 因此, 土壤 SOC 稳定性更低, 同时也暗示在未来气候变化条件下, 暗针叶林与针阔混交林和阔叶林相比, 其土壤的 CO₂ 排放风险更大。这一研究结果反映了不同森林物种及其根系, 以及土壤生物活动等对土壤有机碳累积和形态转化的作用差异。

本研究涉及的 3 种森林类型土壤 LFOC 含量介于 7.34~23.40g·kg⁻¹ 之间, 高于热带^[29-30]和暖温带^[31], 但比温带长白山^[32]和川西卧龙自然保护区^[33]的观测结果低。很可能是因为本研究区域由于受低温和光照的限制, 林下生物活跃度低于热带和暖温带, 但又高于同类型的卧龙等区域的亚高山生态系统。同

样, 暗针叶林相对于常绿-落叶阔叶林和针阔混交林较高的 LFOC/SOC 比值则可能是由于温度的限制, 不同分解程度的动植物残体、木质素等不能及时矿化分解, 从而导致暗针叶林 LFOC 在 0-15cm 土壤表层具有较大的累积。该结果进一步证实了低温对轻组分有机碳累积的促进作用^[33]。

土壤 MBC 占有有机碳含量的比例为 0.37%~0.48%, 略低于神农架、子午岭和岷江冷杉林的相关研究结果^[26, 33-34], 说明由于温度限制, 亚高山生态系统土壤微生物不如其它类型生态系统活跃。3 种植被类型间 MBC 含量的差异, 反映了植物物种及由此导致的植物凋落物的差异对土壤微生物含量和组成的潜在影响^[35]。由于微生物对枯枝落叶的分解是 DOC 的主要形成途径, 微生物代谢强度能影响 DOC 的含量^[36], 暗针叶林与另两种林型相比其略高的 MBC 比值正是导致该森林类型土壤具有较高 DOC 组分的原因。

3.2 结论

(1) 川西贡嘎山海拔 2000-3600m 范围内由低到高所选 3 种主要森林类型中, 表层土壤 (0-15cm) 有机碳含量和密度均表现为: 针阔混交林最高, 其次为落叶阔叶林, 暗针叶林最低, 说明同一地区不同森林类型有机碳的累积和存储能力不同。

(2) 3 种森林类型表层 (0-15cm) 土壤 DOC 和 LFOC 含量均具有显著性差异 ($P < 0.05$), MBC 并无显著差异。DOC、LFOC 和 MBC 含量均以针阔混交林最高, 但其相对于总有机碳的比例在暗针叶林最高, 高海拔更有利于活性有机碳的累积。随着土层厚度的增加, DOC、MBC 和 LFOC 含量降低, 0-5cm 土层比 5-15cm 土层具有较高的活性 SOC 含量。

(3) 贡嘎山川西亚高山生态系统是中国典型的原始自然森林, 土壤发育程度较高, 土壤拥有较高的有机碳和密度, 有明显的蓄积量, 是中国森林生态系统的重要碳汇。

参考文献 References

- [1] 王绍强, 朱松丽. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
Wang S Q, Zhu S L. A analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in china[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 533-544. (in Chinese)
- [2] 李斌, 方晰, 李岩, 等. 湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4265-4278.
- [3] Li B, Fang X, Li Y, et al. Dynamic properties of soil organic carbon in Huan' s forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4265-4278. (in Chinese)
- [4] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 2-3.
- [5] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1412-1417.
- [6] Liu M, Yu W T, Jiang Z S, et al. A research review on soil active organic carbon[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(11): 1412-1417. (in Chinese)
- [7] 梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 889-893.
- [8] Liang Q P, Yu X X, Pang Z, et al. Study on soil organic carbon density of different forest types[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4): 889-893. (in Chinese)
- [9] 秦纪洪, 王琴, 孙辉. 川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5858-5864.
- [10] Qin J H, Wang Q, Sun H. Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5858-5864. (in Chinese)
- [11] Zinn Y L, Andrade A B, Araujo M A, et al. Soil organic carbon retention more affected by altitude than texture in a forested mountain range in Brazil[J]. Soil Research, 2018, 56(3): 284-295.
- [12] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps[J]. Global Change Biology, 2005, 11(7): 1024-1041.
- [13] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. 林业科学, 2005, (1): 10-13.
- [14] Jiang P K. Soil active carbon pool under different types of vegetation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, (1): 10-13. (in Chinese)
- [15] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, et al. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(10): 1923-1928.
- [16] Yan Y, Wang X D. Distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen on the Yajiang vertical belt, Gongga Mountain around the Dadu River banks[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2008, 13(3): 331-335.
- [17] 王庆礼, 代力民, 许广山. 简易森林土壤容重测定方法[J]. 生

- 态学杂志,1996,(3):68-69.
- Wang Q L,Dai L M,Xu G S.A sampling method in measuring forest soil bulk density[J].Chinese Journal of Ecology, 1996,(3):68-69.(in Chinese)
- [13] Kalbitz K,Solinger S,Park J H,et al.Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils:a review[J]. Soil Science,2000,165(4):277-304.
- [14] Vance E D,Brookes P C,Jenkinson D S.Microbial biomass measurements in forest soils:the use of the chloroform fumigation-incubation method in strongly acid soils[J].Soil Biology & Biochemistry,1987,19(6):697-702.
- [15] Boone R D.Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization[J].Soil Biology & Biochemistry,1994,26(11):1459-1468.
- [16] Janzen H H,Campbell C A,Brandt S A,et al.Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J].Soil Science Society of America Journal,1992,56(6):1799-1806.
- [17] 金峰,杨浩,蔡祖聪,等.土壤有机碳密度及储量的统计研究[J].土壤学报,2001,38(4):522-528.
- Jin F,Yang H,Cai Z C,et al.Calculation of density and reserve of organica carbon in soils[J].Acta Pedologica Sinica, 2001,38(4):522-528.(in Chinese)
- [18] 肖安序.亚高山不同植被土壤有机碳、氮素及其影响因素研究[D].成都:四川农业大学,2015.
- Xiao A X.Study on characteristics and influence factors of soil organic carbon and nitrogen in different subalpine vegetation types[D].Chengdu:Sichuan Agricultural University,2015.(in Chinese)
- [19] 黄林,王峰,周立江,等.不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J].生态学报,2012,32(19):6110-6119.
- Huang L,Wang F,Zhou L J,et al.Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties[J].Acta Ecologica Sinica,2012,32(19):6110-6119. (in Chinese)
- [20] 马明东,李强,罗承德,等.卧龙亚高山主要森林植被类型土壤碳汇研究[J].水土保持学报,2009,23(2):127-131.
- Ma M D,Li Q,Luo C D,et al.Study on soil labile organic carbon under some main forest types in Wolong Nature Reserve,China[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(2):127-131.(in Chinese)
- [21] 丁咸庆,马慧静,朱晓龙,等.大围山不同海拔森林土壤有机碳垂直分布特征[J].水土保持学报,2015,29(2):258-262.
- Ding X Q,Ma H J,Zhu X L,et al.The vertical distribution characteristics of soil organic carbon in differ altitude of Dawei Mountain[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(2):258-262.(in Chinese)
- [22] 丁访军,潘忠松,周凤娇,等.黔中喀斯特地区 3 种林型土壤有机碳含量及垂直分布特征[J].水土保持学报,2012,26(1): 161-164.
- Ding F J,Pang Z S,Zhou F J,et al.Organic carbon contents and vertical distribution characteristics of the soil in three types of the karst regions in central Guizhou province[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(1):161-164. (in Chinese)
- [23] 孙筱璐,唐佐芯,尤业明,等.气候和林分类型对土壤团聚体有机碳的影响[J].广西植物,2018,38(3):341-351.
- Sun X L,Tang Z X,You Y M,et al.The influence of climate and forest types on soil aggregation organic carbon[J].Guihaia,2018,38(3):341-351.(in Chinese)
- [24] 高杰,郭子健,刘艳红.北京松山天然油松林土壤有机碳分布及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(10): 2707-2713.
- Gao J,Guo Z J,Liu Y H.Soil organic carbon distribution and its influencing factors of Beijing Songshan natural Chinese pine forests[J].Chinese Journal of Ecology,2016,35(10): 2707-2713.(in Chinese)
- [25] 万忠梅,宋长春,杨桂生,等.三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系[J].环境科学报, 2009,29(2):406-412.
- Wan Z M,Song C C,Yang G S,et al.The active soil organic carbon fraction and its relationship with soil enzyme activity in different types of marshes in the Sanjiang Plain[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2009,29(2):406-412.(in Chinese)
- [26] 向成华,栾军伟,骆宗诗,等.川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布[J].生态学报,2010,30(4):1025-1034.
- Xiang C H,Luan J W,Luo Z S,et al.Labile soil organic carbon distribution on influenced by vegetation types along an elevation gradient in west Sichuan,China[J].Acta Ecologica Sinica,2010,30(4):1025-1034.(in Chinese)
- [27] 卢慧,丛静,薛亚东,等.海拔对神农架表层土壤活性有机碳含量的影响[J].林业科学,2014,50(8):162-167.
- Lu H,Cong J,Xue Y D,et al.Eeffcts of elevation on surface layer soil active organic carbon content in Shennongjia nature reserve[J].Scientia Silvae Sinicae,2014,50(8):162-167. (in Chinese)

- [28] 刘帅,陈玥希,孙辉,等.西南亚高山-高山海拔梯度上森林土壤水溶性有机碳时间动态[J].西北林学院学报,2015,30(1): 33-38.
- Liu S,Chen Y X,Sun H,et al.Temporal dynamics of DOC in forest soil along an elevational gradient of subalpine-alpine in the southwestern China[J].Journal of Northwest forestry University,2015,30(1):33-38.(in Chinese)
- [29] 陈小花,杨青青,余雪标,等.热带海岸防护林土壤活性有机碳分布特征:人工林与天然次生林比较[J].热带作物学报,2017,38(3):494-499.
- Chen X H,Yang Q Q,Yu X B,et al.Distribution characteristics of soil active organic carbon of coastal protective forest in the tropics:comparison of plantation and natural forest[J].Chinese Journal of Tropical Crops,2017,38(3):494-499.(in Chinese)
- [30] 李洁,盛浩,周萍,等.亚热带丘陵几种林地土壤剖面有机碳和轻组有机碳的分布[J].土壤通报,2013,44(4):851-857.
- Li J,Sheng H,Zhou P,et al.The profile of organic carbon and light fraction organic carbon in several types of subtropical hilly woodland soils[J].Chinese Journal of Soil Science,2013, 44(4):851-857.(in Chinese)
- [31] 王肖楠.北京低山地区栓皮栎林与油松林土壤有机碳及其组分研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- Wang X N.Soil organic carbon and its fraction under *Quercus variabilis* & *Pinus tabulaeformis* plantations in lower mountain area,Beijing[D].Beijing:Beijing Forestry University,2011.(in Chinese)
- [32] 孙金兵,桑英,宋金凤,等.长白山典型森林土壤黑碳含量及不同组分中的分布特征[J].林业科学研究,2016,29(1): 34-40.
- Sun J B,Sang Y,Song J F,et al.Content and distribution of black carbon in typical forest soils in Changbaishan Mountains[J].Forest Research,2016,29(1):34-40.(in Chinese)
- [33] 宫立,刘国华,李宗善,等.川西卧龙岷江冷杉林土壤有机碳组分与氮素关系随海拔梯度的变化特征[J].生态学报,2017,37(14):4696-4705.
- Gong L,Liu G H,Li Z S,et al.Altitudinal changes in nitrogen,organic carbon,and its labile fractions in different soil layers in an *Abies faxoniana* forest in Wolong[J].Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4696-4705.(in Chinese)
- [34] 李菊,王琴,孙辉.海拔梯度对川西高寒土壤轻组分有机碳动态影响研究[J].水土保持研究,2015,22(1):51-55.
- Li J,Wang Q,Sun H.Temporal dynamics of light-fraction organic carbon of subalpine-alpine soil along an altitudinal gradient in the southwestern China[J].Research of Soil and Water Conservation,2015,22(1):51-55.(in Chinese)
- [35] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原不同乔木林土壤微生物量碳氮和溶解性碳氮的特征[J].生态学报,2015,35(11): 3598-3605.
- Zeng Q C,Li X,Dong Y H,et al.Soil microbial biomass nitrogen and carbon,water soluble nitrogen and carbon under different arbors forests on the loess plateau[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(11):3598-3605.(in Chinese)
- [36] 王春阳,周建斌,夏志敏,等.黄土高原区不同植物凋落物搭配对土壤微生物量碳、氮的影响[J].生态学报,2011,31(8): 2139-2147.
- Wang C Y,Zhou J B,Xia Z M,et al.Effects of mixed plant residues from the loess plateau on microbial biomass carbon and nitrogen in soil[J].Acta Ecologica Sinica,2011,31(8): 2139-2147.(in Chinese)