

DOI: 10.5846/stxb202009082341

赵青, 刘爽, 陈凯, 王世君, 吴承祯, 李健, 林勇明. 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. 生态学报, 2021, 41(13): 5328-5339.

Zhao Q, Liu S, Chen K, Wang S J, Wu C Z, Li J, Lin Y M. Change characteristics and influencing factors of soil organic carbon in *Castanopsis eyrei* natural forests at different altitudes in Wuyishan Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5328-5339.

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

赵 青^{1,2}, 刘 爽^{1,2}, 陈 凯^{1,2}, 王世君^{1,2}, 吴承祯^{3,4}, 李 健^{1,2,*}, 林勇明^{1,2}

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002

3 福建省生态产业绿色技术重点实验室, 南平 354300

4 武夷学院生态与资源工程学院, 南平 354300

摘要:为揭示中亚热带常绿阔叶林建群种——甜槠天然林不同海拔土壤有机碳含量垂直分布差异及影响机制,以武夷山自然保护区甜槠天然林单一植被类型为研究对象,在其集中分布的 5 个海拔梯度(540、700、850、1022、1200 m)范围内设置固定样地,测定每个海拔梯度不同深度土层土壤因子(土壤全氮、全磷、土壤 pH 值、容重、土壤有机质、粉粒、砂粒、粘粒)、气候因子(土壤温度)、植被因子(细根生物量)及土壤有机碳含量等指标,分析了土壤有机碳沿海拔及垂直土层分布特征,并在主成分分析基础上构建了基于主控因子的线性回归模型。结果表明:(1)同一海拔高度,土壤有机碳含量在土壤垂直剖面分布具有明显的“表聚性”现象;同一土层深度,随着海拔升高,土壤有机碳含量逐渐增加,但增幅随土层深度增加而减小,高海拔地区有助于土壤有机碳的固存;(2)不同土层土壤有机碳含量与海拔、土壤全氮、土壤含水量、土壤粉粒呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤温度、土壤容重、土壤粘粒、砂粒呈极显著负相关($P<0.01$);土壤细根生物量、土壤有机质与土壤有机碳含量在土壤表层(0—10、10—20 cm)呈极显著($P<0.01$)或显著正相关($P<0.05$);土壤 pH 值、土壤砂粒与土壤有机碳含量在 20—30 cm 土层呈显著负相关($P<0.05$),但与其他土层关系不显著($P>0.05$);海拔因素是影响土壤有机碳含量分布的主要因素,其次为土壤因素,植被因素主要影响土壤表层有机碳含量分布。(3)海拔因素能通过影响与土壤有机碳形成和转化的因子及改变土壤有机碳的累积和分解速率,对土壤有机碳的分布产生影响。(4)多元线性回归模型拟合 R^2 高于一元线性回归模型拟合 R^2 ,能解释土壤有机碳含量变异的 82.1%—98.1%。由此可见,不同环境因子组合可以更好的解释不同土层土壤有机碳含量随海拔梯度的变异。

关键词:土壤有机碳;海拔梯度;武夷山;甜槠;线性回归模型

Change characteristics and influencing factors of soil organic carbon in *Castanopsis eyrei* natural forests at different altitudes in Wuyishan Nature Reserve

ZHAO Qing^{1,2}, LIU Shuang^{1,2}, CHEN Kai^{1,2}, WANG Shijun^{1,2}, WU Chengzhen^{3,4}, LI Jian^{1,2,*}, LIN Yongming^{1,2}

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Key Laboratory of Forest ecosystem process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China

3 Key Laboratory for Eco-Industrial Green Technology of Fujian Provincial, Nanping 354300, China

4 College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China

Abstract: *Castanopsis eyrei* is one of the main dominant species in the mid-subtropical evergreen broad-leave forest, and plays an important role in the subtropical forest ecosystem in China. In order to reveal the differences in the vertical

基金项目:国家自然科学基金(42071132);福建农林大学林学高峰学科建设项目(71201800705)

收稿日期:2020-09-08; **修订日期:**2021-03-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianli@fafu.edu.cn

distribution of soil organic carbon content of *Castanopsis eyrei* natural forest at different altitudes and its influencing factors, this study took the single vegetation type of the natural forest of *Castanopsis eyrei* in Wuyishan Nature Reserve as the research object. Fixed sample plots were set up within the range of 5 altitude gradients (540 m, 700 m, 850 m, 1022 m, and 1200 m) distributed in a concentrated manner. By measuring soil factors (soil total nitrogen, total phosphorus, soil pH value, bulk density, soil organic matter, silt, sand and clay), climate factors (soil temperature), vegetation factors (fine root biomass) and soil organic carbon content at different depths of each elevation gradient, the distribution characteristics of soil organic carbon along the uplift and vertical soil layers were analyzed. A linear regression model based on principal component analysis was constructed. The results show that: (1) At the same altitude, the distribution of soil organic carbon content in the vertical profile of soil has obvious “surface aggregation” phenomenon; At the same soil depth, the content of soil organic carbon gradually increases with the increase of altitude, but the increase rate decreases with the increase of soil depth, and the high altitude area is conducive to the retention of soil organic carbon. (2) Soil organic carbon content in different soil layers is positively correlated with altitude, soil total nitrogen, soil water content and soil silt ($P<0.01$), and negatively correlated with soil temperature, soil bulk density, soil clay and sand ($P<0.01$); In the surface layer of soil (0—10 cm, 10—20 cm), the biomass of fine roots and soil organic carbon content, soil organic matter and soil organic carbon content are extremely significant ($P<0.01$) or significantly positively correlated ($P<0.05$). There is a significant negative correlation between soil pH and soil organic carbon content ($P<0.05$), and between soil sand and soil organic carbon content in 20—30 cm soil layer ($P<0.05$), but there is no significant correlation between these two factors and soil organic carbon content in other soil layers ($P>0.05$). Altitude is the main factor affecting the distribution of soil organic carbon content, followed by soil, and vegetation mainly affects the distribution of soil surface organic carbon content. (3) Altitude factors can affect the distribution of soil organic carbon by affecting the formation and transformation factors of soil organic carbon and changing the accumulation and decomposition rate of soil organic carbon. (4) The fitting R^2 of the multiple linear regression model is higher than that of the one-variable linear regression model, which can explain 82.1%—98.1% of the variation of soil organic carbon content. It can be seen that different combinations of environmental factors can better explain the variation of soil organic carbon content in different soil layers with altitude gradients.

Key Words: soil organic carbon; altitude gradient; Wuyi Mountain; *Castanopsis eyrei*; linear regression model

在全球范围内大约有 1550 Pg 碳是以有机质的形式储存于土壤中,土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)储量占到全球碳库总储量的 2/3 以上,是大气碳库(750 Pg)的 2 倍,生物碳库(500—600 Pg)的 3 倍^[1-2]。森林土壤碳库作为陆地碳库的重要组成部分,占全球土壤有机碳库的 70% 以上^[2],其微小变化即会显著引起大气圈中 CO₂ 浓度波动,从而影响全球气候变化。因此深入研究森林 SOC,揭示其分布特征与影响因素对于准确评估全球碳储量及碳循环具有重要的意义。

目前,国内外学者已经对 SOC 的累积、组成及差异性开展了大量的研究工作,杨玉海等^[3]对伊犁河谷 9 种不同植被类型土壤有机碳含量研究表明,土壤有机碳含量与植被类型显著相关;孟苗婧等^[4]对不同海拔梯度下黄山松针阔混交林土壤有机碳含量研究得出,高海拔处土壤温度过低会对 SOC 的分解产生影响;丛高等^[5]通过分析不同海拔 SOC 与黏粒矿物组成之间的关系,得出不同林型土壤有机碳含量及其组分之间差异显著;Post 等^[6]表明 SOC 含量受植被类型的影响,其大小由植物残体量及微生物分解量决定;Zinn 等^[7]通过研究不同海拔巴西森林 SOC 含量,指出海拔是影响热带森林 SOC 含量的主要因素;但这些研究集中于在不同区域、不同植被类型间对 SOC 含量进行研究,由于森林植被覆盖类型、水热条件、土壤理化性质等条件的综合影响,以及森林土壤时空异质性的复杂性,对不同森林植被类型在不同区域上 SOC 含量的估算存在极大的不确定性^[8]。特别是海拔作为一个综合性的影响因子,可以通过对大尺度区域环境下水热条件的重新分配对 SOC 含量产生影响^[9-10],因此研究同一地区单一植被类型在不同海拔高度 SOC 含量分布特征及影响因素对

于准确估算区域 SOC 储量具有重要的现实意义。

武夷山自然保护区作为世界双遗产保留地,拥有同纬度位置保存较为完好的中亚热带常绿阔叶林,是研究中亚热带森林 SOC 的理想区域^[11]。甜槠林不仅是武夷山自然保护区常绿阔叶林群落的优势种之一^[12],也是中亚热带的典型植被类型之一,在中亚热带森林生态系统碳平衡中占有重要的地位^[13]。近年来,相关学者围绕武夷山自然保护区在不同海拔土壤磷素分布^[14]、土壤微生物氮分布^[15]、表层土壤轻组有机质分布^[16]、SOC 矿化特征^[17]等方面进行了大量研究,然而对于单一森林树种在不同海拔 SOC 分布特征及影响机制方面研究较少,因此,本研究以甜槠林集中分布的 5 个海拔高度土壤作为研究对象,分析甜槠林 SOC 沿不同海拔高度及不同深度垂直剖面土层分布规律,揭示 SOC 含量分布特征及影响机制,旨在为武夷山自然保护区土壤碳储量研究提供基础数据,同时也为中亚热带森林碳储量及碳循环研究提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于武夷山自然保护区内(27°32'36"—27°55'15"N;117°24'12"—118°02'50"E),平均海拔 1200 m,本区拥有世界同纬度现存面积最大、保存最为完整的中亚热带常绿阔叶林生态系统,气候类型属典型的亚热带季风气候,年平均气温为 12.7—18.1℃,年平均降水量在 2000 mm 左右,年平均相对湿度为 82%—85%,年平均雾日在 120 d 以上,无霜期为 252—272 d。区内地势高低悬殊,起伏较剧烈,土壤垂直分异显著,沿海拔从下至上分别为红壤(海拔 700 m 以下)、黄红壤(海拔 700—1100 m)、黄壤(1100—1900 m)、山地草甸(1900 m 以上);植被垂直带谱完整,沿海拔由低到高分别为常绿阔叶林(200—1000 m)、针阔混交林(1000—1350 m)、针叶林(1350—1750 m)、亚高山矮林(1750—1900 m)与高山草甸(1900 m 以上)^[18-19]。

1.2 样地设置及样方调查

将武夷山自然保护区甜槠林集中分布的 5 个不同海拔作为实验样地,分别为生态定位站(540 m)、一里坪(700 m)、三港(850 m)、七里村(1022 m)、玄峰岭(1200 m)。每个海拔梯度内设置 3 块规格为 20 m×20 m 的固定样地,共选取 15 块样地,利用手持 GPS 确定每块样地位置,同时记录每块样地坡度、坡向等地形因子、平均胸径、树高等林分因子、腐殖质层、淋溶层厚度等土壤因子(表 1),采样时间为 2017 年 6 月。

林下植被状况:甜槠天然林海拔 540 m 处植被群落乔木层主要树种为木荷(*Schima superba*)、赤楠(*Syzygium buifolium*)、少叶黄芩(*Engelhardtia fengelii*)等,灌木层树种主要有宜兴苦槠(*Pleioblastus yixingensis*)、马银花(*Rhododendron ovatum*)、冬青(*Ilex chinensis*)、芒萁(*Dicranopreris dichotoma*);海拔 700 m 处甜槠天然林乔木层树种主要有赤楠(*Syzygium buifolium*)、深山含笑(*Michelia maudiae*)、灌木层树种有香槟杜鹃(*R. champinican*)、马银花(*Rhododendron ovatum*)、赤楠(*Syzygium buifolium*)、草本层树种主要有鸡血藤(*Spatholobus suberectus* Dunn)、里白(*Diplopterygium glaucum*)。海拔 850 m 处植被群落乔木层主要树种为木荷(*Schima superba*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、马尾松(*Masson pine*)、刺毛杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch)等,灌木层树种主要有马银花(*Rhododendron ovatum*)、山杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、香槟杜鹃(*R. champinican*),草本层树种主要有淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、里白(*Diplopterygium glaucum*);海拔 1022 m 甜槠天然林群落乔木层主要有木荷(*Schima superba*)、山杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、拉氏栲(*Castanopsis lamontei* Hance),灌木树种主要有大叶赤楠(*Photinia* sp)、少叶黄芩(*Engelhardtia fengelii*)等,草本树种里白(*Diplopterygium glaucum*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*);海拔 1200 m 甜槠林植被群落乔木层树种有木荷(*Schima superba*)、石栎(*Lithocarpus glabra*)、细枝桉(*Eurya loquaiana*)、鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*)、以及一些针叶树种如马尾松(*Masson pine*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等混生其中,灌木层主要有肿节少穗竹(*Oligostachyum oedogonatum*)、冬青(*Ilex chinensis*),草本层较疏松,主要以蕨类为主要如里白(*Diplopterygium glaucum*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)等。

表 1 样地情况调查								
Table 1 Survey of sample plots								
样地 Sample plot	地理位置 Geographical position	海拔/m Altitude	坡度/(°) slope	坡向 slope	平均胸径/cm Mean diameter at breast height	平均树高/m Average tree height	腐殖质层厚度/cm Thickness of humus layer	淋溶层厚度/cm Thickness of leaching layer
1	117°45'06"N, 27°42'34"E	540	28	南	29.5	16.2	3	28
2	117°41'11.5"N, 27°44'3.3"E	700	30	南	32.1	15.5	7	38
3	117°40'48"N, 27°44'52"E	850	25	西南	34.2	15.3	9	37
4	117°39'17"N, 27°43'18"E	1022	20	北	26.4	19.4	10	34
5	117°39'17"N, 27°40'10"E	1200	20	西南	25.6	16.6	8	31

1.3 土壤样品采集及测定

每块样地内采用 S 型方法布设 3 个土壤采样点,共 45 个采样点;土壤采样采用分层采样法,取样时将土壤表层枯枝落叶清除,用直径为 5 cm 的土钻采集 0—10、10—20、20—30 cm 3 个土壤土层,每个样地重复取样 3 次。将相同海拔同一样地土层土壤样品混合均匀装入密封袋带回实验室,待土样自然风干后,捡出石砾、根系、枯枝落叶等杂物,过 2 mm 筛用于指标测定。每个样地挖掘 1 个 0—30 cm 土壤剖面,用环刀采集土样带回实验室用于测定土壤容重。根系生物量测定采用土钻法及全根挖掘法进行取样,每块样地随机选取 3 棵林龄相近的成年甜槠(20 a 左右),在距离树干 1—1.5 m 处用直径为 5 cm 的根钻钻取土芯,共钻取 3 个,用于采集 0—10、10—20、20—30 cm 土层垂直土芯,将同块样地采集土芯分层混合装袋,每个海拔 3 次重复,将其带回实验室用 20 目筛网反复清洗后,捡出细根(根径≤2 mm),风干后称鲜重,然后烘干至恒重。

土壤理化性质测定均采用常规方法测定^[20]。SOC 采用硫酸—重铬酸钾外加加热法进行测定,在温度 170—180℃ 条件下的油浴锅加热保持 5 min,然后用 5 ml 的浓硫酸氧化土壤中的有机碳,再用硫酸亚铁来对添加了邻啡罗琳指示剂的溶液进行滴定,根据所消耗的硫酸亚铁来计算 SOC 的含量,将本研究已测定的 SOC 含量乘以换算系数 1.724 即求得土壤有机质含量。土壤全氮采用硫酸—半微量凯氏定氮法(ATN—300 全自动定氮仪);土壤全磷采用碱熔—钼锑抗比色法;土壤 pH 值采用水土比为 2.5:1 纯水浸提 pH 计法(Starter 3100);土壤温度、含水量采用 TDT(Time Domain Trans-missometry; Acclima, Inc. Meridian, ID, USA)探头进行测定,探头水平埋设在距离地表 5、15、25 cm 处,分别代表土壤 0—10、10—20、20—30 cm 土层温度及土壤含水量值,同时用烘干法对测出的含水量结果进行校准。

1.4 数据分析

采用 SPSS17.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)分析比较不同土层 SOC 在不同海拔间的差异($\alpha=0.05$),采用 Pearson 相关系数法确定各因子间相关关系,采用主成分分析法对相关环境因子进行分析;采用线性回归分析(一元及多元)分析 SOC 与土壤理化性质、气候因子、植物因子间的相关性。

2 结果与分析

2.1 同一土层土壤有机碳含量沿海拔梯度分布特征

武夷山天然甜槠林不同海拔高度 SOC 在同一土层深度上的垂直分布规律如图 1 所示,5 个海拔高度中, SOC 含量均随土层的增加而降低,且降幅随海拔的升高逐渐增加。其中, SOC 含量在海拔 1200 m 中 0—10 cm 土壤土层达到最大,为 72.59 g/kg;在海拔 540 m 中 20—30 cm 土层土壤降至最低,为 15.58 g/kg。除海拔 1022 m 外,所有海拔 3 个土层 SOC 含量差异均显著($P<0.05$)。0—10 cm 土层除海拔 1022 m SOC 含量与 850

m、1200 m SOC 含量差异不显著外,其余海拔 SOC 含量差异均显著;10—20 cm,除海拔 540 m SOC 含量差异显著外,其余海拔 SOC 含量差异均不显著;20—30 cm,除海拔 1200 m SOC 含量与 850 m、1022 m 差异不显著外,其余海拔 SOC 含量均有显著差异($P<0.05$)。0—10 cm 土壤表层 SOC 含量占整个剖面(0—30 cm)SOC 含量的 48.2%—52.7%,且各海拔 0—10 cm 土层 SOC 含量显著高于 10—20、20—30 cm 土层($P<0.05$)。

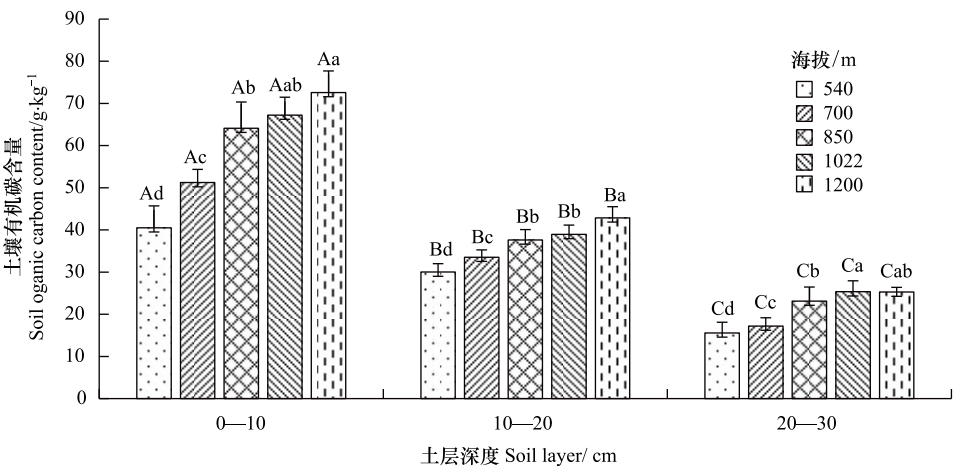


图1 同一土层深度土壤有机碳含量沿海拔梯度分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of soil organic carbon content in the same soil depth along the uplift gradient

不同大写字母表示同一海拔不同土层间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一土层不同海拔间差异显著($P<0.05$)

2.2 环境因子相关指标及与土壤有机碳含量相关关系

从表 2 可知,同一海拔不同土层土壤全氮差异均显著,0—10 cm 土层土壤全磷在海拔 850 m 处最高,海拔 1200 m 处最低,除海拔 850 m 外,其余海拔土壤全磷差异均不显著;10—20、20—30 cm 土层在海拔 850 m 处最高,海拔 540 m 处最低,且 20—30 cm 土层海拔 850m 土壤全磷与其余海拔差异均显著。0—10 土层土壤 pH 值在海拔 540 m 处最高且与其余海拔显著不同;0—10、10—20、20—30 cm 土层土壤含水率随海拔升高逐渐增大,且海拔 1200 m 土壤含水率与其余海拔差异显著;除海拔 850 m、1022 m 外不同土层土壤温度差异均显著;同一海拔不同土层土壤容重、细根生物量、土壤有机质、土壤粉粒、粘粒含量差异均显著。

表 2 不同海拔不同土层环境因子相关指标

Table 2 Relevant indicators of environmental factors at different altitudes and different soil layers						
因子 Factor	土层深度/cm Depth of soil layer	海拔 Altitude/m				
		540	700	850	1022	1200
STNC	0—10	2.33±0.67Ac	2.89±0.16Ab	3.17±0.14Aa	3.36±0.12Aa	3.32±0.19Aa
	10—20	1.50±0.20Bb	2.00±0.17Ba	2.21±0.09Ba	2.18±0.15Ba	2.19±0.17Ba
	20—30	0.53±0.13Cc	0.97±0.11Cb	1.32±0.30Ca	1.33±0.13Ca	1.28±0.13Ca
STPC	0—10	0.19±0.05Ab	0.31±0.11Ab	0.33±0.07Aa	0.20±0.08Ab	0.17±0.08Bb
	10—20	0.14±0.10Bb	0.21±0.06Bab	0.31±0.07Ba	0.18±0.05Bb	0.20±0.03Aab
	20—30	0.11±0.04Cc	0.19±0.03Bb	0.29±0.02Ca	0.17±0.02Bb	0.15±0.05Bb
pH	0—10	4.94±0.11Ca	4.52±0.11Cb	4.42±0.17Bb	4.32±0.10Cb	4.56±0.98Bb
	10—20	5.12±0.14Aa	4.74±0.19Bc	4.53±0.12Bbc	4.48±0.09Bbc	4.58±0.12Bb
	20—30	5.02±0.12Ba	4.99±0.43Aa	4.76±0.06Ab	4.58±0.15Ab	4.87±0.12Aab
SWC	0—10	25.43±1.30Cc	27.77±1.01Bc	30.10±0.11Bbc	33.84±1.32Ab	36.20±1.51Aa
	10—20	26.85±1.34Bc	27.83±1.42Bbc	30.46±1.37Ab	31.16±2.11Bb	35.29±1.15Ba
	20—30	27.74±0.96Ac	29.22±0.79Ab	30.55±0.52Ab	30.12±0.34Cb	32.60±0.39Ca

续表						
因子 Factor	土层深度/cm Depth of soil layer	海拔 Altitude/m				
		540	700	850	1022	1200
ST	0—10	24.71±1.36Aa	24.21±1.1Aab	22.39±0.60Ac	21.33±1.23Ac	21.10±0.57Ac
	10—20	23.54±2.03Ba	22.79±0.75Ba	22.02±0.47Aa	21.05±0.57Ab	20.18±0.49Bb
	20—30	22.51±1.11Ca	21.62±1.22Cab	21.17±0.23Bb	20.46±0.46Bb	19.35±0.49Cc
SBD	0—10	1.23±0.88Ca	1.13±0.481Cb	0.97±0.91Cc	0.84±0.87Cd	0.77±0.71Cd
	10—20	1.63±0.21Ba	1.51±0.09Bab	1.32±0.56Bbc	1.26±0.60Bed	1.16±0.05Bd
	20—30	2.02±0.12Aa	1.82±0.13Ab	1.62±0.06Ac	1.61±0.21Ac	1.4±0.10Ad
FRB	0—10	1.14±0.90Ad	1.54±0.13Ac	1.84±0.15Ab	2.26±0.09Aa	1.77±0.11Ac
	10—20	0.73±0.14Bc	0.68±0.05Bc	0.85±0.07Bb	0.77±0.04Bb	1.02±0.09Ba
	20—30	0.53±0.04Cb	0.45±0.04Cb	0.52±0.05Cb	0.51±0.11Cb	0.63±0.51Ca
SOM	0—10	75.16±1.90Ad	89.94±1.68Ab	118.45±1.76Aa	87.49±0.84Ac	129.31±3.41Aa
	10—20	59.06±1.67Bb	65.59±4.29Ba	71.01±6.90Ba	67.21±2.88Ba	70.11±1.64Ba
	20—30	35.42±3.53Cc	46.18±2.45Cb	54.13±4.94Cb	59.52±6.83Ca	64.68±6.86Ca
Si	0—10	37.74±1.43Ac	38.99±1.79Ac	41.21±2.27Abc	44.98±3.07Ab	48.36±1.10Ba
	10—20	32.55±1.67Bc	35.93±1.25Bbc	37.16±1.06Bb	36.70±0.75Bb	50.32±2.75Aa
	20—30	27.61±1.10Cc	29.35±1.37Cc	31.95±1.86Cbc	33.62±0.62Bb	41.66±3.75Ca
Cl	0—10	30.66±1.54Cb	32.12±1.79Aa	28.97±1.65Abc	25.30±2.08Ac	24.51±0.95Ac
	10—20	37.84±2.23Ba	27.78±2.23Bc	28.31±1.03Ab	25.59±0.74Ac	23.94±1.55Ac
	20—30	43.85±4.91Aa	26.08±1.58Bb	22.77±3.15Bc	21.71±4.98Bc	19.02±7.96Bc
Sa	0—10	31.59±1.78Aa	28.89±1.67Cb	29.83±1.21Ca	29.72±1.50Ca	27.13±2.47Bb
	10—20	29.61±1.73Bc	36.29±2.10Ba	34.53±1.98Bb	37.71±0.69Ba	25.74±1.31Bc
	20—30	28.54±1.23Bc	44.58±0.73Aa	45.28±1.37Aa	44.67±1.25Aa	39.32±0.17Ab

不同大写字母表示同一海拔不同土层间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一土层不同海拔间差异显著($P<0.05$); STNC:土壤全氮含量,Soil total nitrogen content; STPC:土壤全磷含量, Soil total phosphorus content; SWC:土壤含水量, Soil water content; ST:土壤温度, soil temperature; SBD:土壤容重, soil bulk density; FRB:细根生物量, Fine root biomass; SOM:土壤有机质含量, Soil organic matter; Sa:土壤砂粒, Soil Sand; Si:土壤粉粒, Soil Silt; Cl:土壤粘粒, Soil Clay

通过 Pearson 相关性分析结果显示(表 3):不同土层 SOC 含量与海拔、土壤全氮、土壤含水量、土壤温度、土壤粉粒均呈均呈显著($P<0.05$)或极显著相关关系($P<0.01$);土壤细根生物量、土壤有机质含量仅与 0—10、10—20 cm 土层 SOC 含量呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关关系;不同土层 SOC 含量与土壤全磷不相关,土壤 pH 值、土壤砂粒含量仅与 20—30 cm 土壤底层 SOC 含量显著($P<0.05$)或极显著相关($P<0.01$)。这表明武夷山天然甜槠林 0—30 cm 范围内不同深度土层 SOC 含量的改变依赖于海拔高度、土壤容重及土壤机械组成变化,以及由海拔升高引起的土壤温度、土壤含水量变化。

表 3 不同土层土壤有机碳与环境因子相关性

Table 3 Correlation between soil organic carbon and environmental factors in different soil layers												
土层深度/cm Depth of soil layer	STNC	STPC	pH	SWC	ST	SBD	FRB	SOM	Altitude	Si	Cl	Sa
0—10	0.887 **	0.107	-0.68	0.825 **	-0.767 **	-0.849 **	0.803 **	0.776 **	0.885 **	0.844 **	-0.823 **	-0.787 *
10—20	0.837 **	0.346	-0.712	0.830 **	-0.783 **	-0.745 **	0.606 *	0.648 *	0.874 **	0.793 **	-0.865 **	-0.364
20—30	0.829 **	0.513	-0.771 *	0.788 **	-0.804 **	-0.894 **	0.277	0.864	0.850 **	0.706 *	-0.777 *	-0.840 **

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

2.3 影响土壤有机碳含量的因子分析

由于细根生物量是植物自身指数,因此归为植物因子,土壤 pH 值、土壤全氮含量、土壤容重、土壤有机

质、土壤粉粒、粘粒、砂粒是土壤理化指标,归为土壤因子,土壤含水量、土壤温度归为气候因子。本研究通过主成分分析提取影响武夷山天然甜槠林土壤各层 SOC 的主要因子(表 4)。结果显示,0—10、20—30 cm 土层主成分中大于 1 的特征值成分有 2 个,累计解释变量分别为 83.277%、82.291%,10—20 cm 土层主成分中大于 1 的特征值成分有 3 个,累计解释变量为 87.752%,能反映不同海拔垂直分异土层 SOC 的绝大部分信息。0—10 cm 土层第一主成分 SOC 受土壤全氮、土壤含水量、土壤温度、土壤粉粒、粘粒、容重、生物量、海拔等地形、土壤、气候、植被因子的影响,累计解释变量达 68.809%;10—20 cm 土层第 1 主成分 SOC 与海拔、土壤含水量、土壤温度、粘粒、容重相关性大,累计解释变量达 45.635%,第二主成分中土壤粉粒与 SOC 相关性大,累计解释变量达 67.086%;20—30 cm 土层第 1 主成分 SOC 受海拔、土壤温度、土壤含水量、土壤有机质、土壤粉粒等土壤因子的影响,累计解释变量达 48.719%,第二主成分中土壤砂粒与 SOC 相关性最大,累积解释 20—30 cm 土壤 SOC 变异达 82.291%。

表 4 不同土层土壤有机碳与环境因子分析

Table 4 Analysis of soil organic carbon and environmental factors in different soil layers

变量 Variable	0—10 cm			10—20 cm				20—30 cm		
	F1	F2	IC	F1	F2	F3	IC	F1	F2	IC
STNC	0.799	0.488	0.876	0.840	-0.110	0.350	0.839	0.578	0.692	0.813
STPC	-0.280	0.795	0.710	-0.009	0.105	0.972	0.957	-0.070	0.799	0.643
pH	-0.509	-0.772	0.854	-0.690	0.034	-0.683	0.943	-0.263	-0.671	0.519
SWC	0.966	0.075	0.939	0.701	0.584	0.255	0.897	0.855	0.401	0.891
ST	-0.883	-0.141	0.800	-0.873	-0.228	0.060	0.818	-0.839	-0.353	0.828
SBD	-0.950	-0.081	0.909	-0.700	-0.327	-0.461	0.810	-0.839	-0.480	0.933
FRB	0.726	0.438	0.719	0.374	0.786	0.295	0.844	0.825	-0.354	0.806
SOM	0.684	0.182	0.502	0.499	0.228	0.681	0.765	0.787	0.455	0.826
海拔 Altitude	0.977	0.093	0.964	0.903	0.335	0.175	0.959	0.891	0.407	0.959
Si	0.962	-0.045	0.927	0.682	0.669	0.015	0.913	0.964	0.106	0.941
Cl	-0.961	0.055	0.927	-0.928	0.004	-0.288	0.945	-0.473	-0.751	0.788
Sa	-0.930	-0.025	0.865	0.138	-0.907	-0.001	0.841	0.231	0.935	0.928
特征值 Characteristic value	8.257	1.736		5.476	2.574	2.480		5.846	4.029	
解释变量 Explain variables	68.809	14.468		45.635	21.452	20.666		48.719	33.572	
累计解释变量 Cumulative explanatory variable	68.809	83.277		45.635	67.086	87.752		48.719	82.291	

F1、F2、F3:因子 Factor; IC: 指标共同度 Index commonality

2.4 土壤有机碳含量回归模型创建

主成分分析法的应用虽然可以得到各影响因子间总体分类关系,同时众多因子间多重共线性能进一步被消除,但不能得到各影响因子间的定量关系,只分析单个影响因子不能完全弄清各因子对 SOC 含量的影响机制,因此对主成分分析得出的各土壤层次主要影响因子进一步做回归分析,建立相应模型量化各影响因子对 SOC 的影响程度。

2.4.1 不同土层土壤有机碳含量一元线性回归模型

基于单变量一元回归分析,可得出不同土层主要影响因子与 SOC 含量的一元线性回归方程(表 5)。三个垂直土层 SOC 含量均与海拔、土壤含水量、全氮、容重呈极显著相关关系($P<0.01$),除此之外,0—10 cm 土层与细根生物量、土壤粉粒、粘粒亦呈极显著相关关系($P<0.01$),能解释土壤有机碳含量的 64.5%—78.6%的变异,其中全氮与土壤有机碳含量拟合 R^2 最大(78.6%);10—20 cm 土层除细根生物量与 SOC 呈显著相关外($P<0.05$),亦与土壤粉粒、粘粒达到极显著相关($P<0.01$),能解释土壤有机碳含量的 55.6%—74.8%的变异,其中土壤粘粒与土壤有机碳含量拟合 R^2 最大(74.8%);20—30 cm 土层还与土壤砂粒、粘粒达极显著相关关系($P<0.01$),能解释 SOC 含量的 60.5%—78.9%的变异。

表 5 不同土层土壤有机碳含量一元线性回归方程

Table 5 Univariate linear regression equation of soil organic carbon content in different soil layers

土层深度/cm Depth of soil layer	回归方程 Regression equation	R^2	F	P
0—10	$y = 7.520x + 36.714$	0.764	42.151	<0.01
	$y = 2.484 \text{ SWC} - 16.915$	0.680	27.635	
	$y = 27.062 \text{ STNC} - 22.308$	0.786	47.791	
	$y = -55.617 \text{ SBD} + 114.224$	0.720	33.453	
	$y = 25.882 \text{ FRB} + 14.983$	0.645	23.069	
	$y = 0.2956 \text{ Si} + 24.733$	0.712	32.117	
	$y = -2.1419 \text{ Cl} + 118.11$	0.677	27.207	
10—20	$y = 2.488x + 27.728$	0.723	33.965	
	$y = 1.072 \text{ SWC} + 2.696$	0.689	28.806	
	$y = -2.195 \text{ ST} + 83.301$	0.613	20.55	
	$y = -16.165 \text{ SBD} + 57.435$	0.556	16.253	
	$y = 9.635 \text{ STNC} + 16.032$	0.700	30.342	
	$y = 1.2705 \text{ Si} - 6.182$	0.705	31.125	
	$y = -1.1308 \text{ Cl} + 68.687$	0.748	38.623	
20—30	$y = 5.328 x + 13.452$	0.783	46.99	
	$y = 3.987 \text{ pH} - 90.371$	0.621	21.285	
	$y = -5.656 \text{ ST} + 148.335$	0.647	23.801	
	$y = 0.626 \text{ Sa} + 23.089$	0.705	31.072	
	$y = -0.9592 \text{ Cl} + 55.12$	0.605	19.87	
	$y = -34.033 \text{ SBD} + 87.134$	0.789	51.495	

y : 土壤有机碳 Soil organic carbon; x : 海拔 Altitude

2.4.2 不同土层土壤有机碳含量多元线性回归模型

基于多元回归分析,可得出不同土层主要影响因子与 SOC 含量的多元线性回归方程(表 6)。0—10 cm 土层中地形因子(海拔)、土壤性质(全氮、容重)与 SOC 含量拟合 R^2 为 0.832,地形因子(海拔)、土壤性质(全氮)、植被因子(细根生物量)与 SOC 含量拟合 R^2 为 0.843,高于单因素回归拟合 R^2 ;地形因子(海拔)、土壤性质(全氮、容重、土壤粉粒、粘粒)与 SOC 含量拟合 R^2 为 0.866,高于单因素回归拟合及相关多元线性回归组合 R^2 ,可见海拔、全氮、容重与土壤机械组成结合能更好的解释 0—10 cm SOC 含量的变异;10—20 cm 土层中,海拔、土壤全氮、水分、温度、土壤粉粒、粘粒与 SOC 含量拟合度最高(0.940),能更好的解释不同海拔 10—20 cm SOC 含量的变异;20—30 cm 土层中海拔、土壤砂粒、容重、pH 与 SOC 含量拟合度最高(0.981)。可见,多因子对 SOC 的解释明显高于单因子,SOC 含量变化是多种因子综合作用的结果。

3 结论与讨论

3.1 甜槠天然林土壤有机碳剖面分布特征及空间分布规律

武夷山天然甜槠林同一海拔 SOC 含量垂直分异表现出随土层增加而降低,且土壤表层(0—10 cm)SOC 含量明显高于底层(20—30 cm),呈现明显的“表聚性”特征,这与王会利等^[21]对青冈林土壤剖面 SOC 垂直分布及蔡文良^[22]对热带山地雨林 SOC 分布研究结果一致。一方面这可能是因为土壤表层积累了大量枯枝落叶及动植物残体,同时甜槠天然林根系主要分布于土壤表层,而表层 SOC 主要来源于根系分泌物,枯枝落叶及根系的腐殖质等,加之表层适宜的土壤温度、水分等环境因子,良好的通气和养分状况使得好气微生物活动旺盛^[23-24],更有利于地表凋落物分解、腐殖化过程,使得土壤容重降低,有机质含量增加,土壤碳含量不断累积;另一方面随着土层深度增加,植物凋落物减少,植被根系密度降低,土壤质地变的愈发紧实(表 2),表层土壤有机质向下迁移受到限制^[25],使得 SOC 含量随土层深度增加而降低,但在不同海拔间降幅存在较大差异,这种垂直分布差异可能与不同海拔甜槠天然林土壤有机质及细根生物量分布差异有关,甜槠林细根主要分布

于 0—20 cm 土壤表层,而细根高度富集于土壤表层有利于高效吸收来自凋落物分解释放的养分,同时可以截留林冠淋溶的养分,影响进入土壤中有机的含量及在剖面中的分布^[26],进而对不同土壤剖面 SOC 含量造成影响。

表 6 不同土层土壤有机碳含量多元线性回归方程

Table 6 Multiple linear regression equation of soil organic carbon content in different soil layers

土层深度/cm Depth of soil layer	回归方程 Regression equation	R^2	F	P
0—10	$y = 2.690x + 15.284STNC - 8.836SBD + 13.861$	0.832	18.128	
	$y = 2.875x + 10.818STNC + 6.198FRB + 13.707$	0.843	13.431	
	$y = 24.34 + 21.001STNC - 0.447x + 8.664SBD - 1.395Cl$	0.862	15.607	
	$y = -76.763 + 22.901STNC - 0.787x + 9.536SBD + 1.416Si$	0.856	14.896	
	$y = -26.736 + 23.444STNC - 1.414x + 13.498SBD + 0.753Si - 0.931Cl$	0.866	11.680	
10—20	$y = 6.459STNC - 0.210x + 0.588$	0.883	27.67	
	$y = 6.059STNC - 0.677x + 0.771SWC - 0.561ST + 14.096$	0.896	21.485	
	$y = -0.797x + 0.760SWC + 6.021STNC - 0.614ST - 0.879SBD + 17.245$	0.896	15.507	<0.01
	$y = 20.152 + 5.302STNC + 1.499x$	0.821	27.482	
	$y = -0.783 + 7.986STNC + 0.223x + 0.175Cl + 0.373Si$	0.921	28.969	
20—30	$y = 4.472 + 7.089STNC - 0.850x + 0.062Cl + 0.282Si + 0.454SWC - 0.329ST$	0.940	20.790	
	$y = 0.238pH + 0.973x - 18.363SBD + 45.269$	0.847	0.847	
	$y = 0.094pH + 1.935x - 36.295SBD + 3.36ST + 9.646$	0.860	0.86	
	$y = 1.590x - 31.763SBD + 2.537ST + 5.445STNC + 19.221$	0.870	16.791	
	$y = 80.439 - 11.068pH + 1.620x - 12.036SBD + 0.437Sa$	0.981	127.087	

3.2 甜槠天然林土壤有机碳剖面分布差异及影响因素

SOC 累积量与土壤表层有机质输入及周转速度相关,尤其是对于山地森林生态系统,海拔因素是影响 SOC 累积的主导因子之一^[27]。本研究表明,武夷山自然保护区甜槠天然林 SOC 分布特征与海拔因素呈极显著正相关($P<0.01$),表现为 0—30 cm SOC 含量随海拔高度增加而增大,这与张亚茹等^[28]表明鼎湖山常绿阔叶林 SOC 具有强烈的空间异质性,且随着海拔升高而增加研究结果一致,但与 Sheikh^[29]对亚热带松果林、温带阔叶林 SOC 随海拔升高而降低;曹瑞等^[30]对高山峡谷区 SOC 组分研究表明,SOC、水溶性碳随海拔增加呈先增加后减少结果不一致,这可能与植被类型、地形地貌条件不同导致 SOC 在不同海拔地区呈现不同的变化规律有关。海拔不仅作为一个地形因子,还作为一个综合性的环境因子,并非直接对土壤中的 SOC 含量产生影响,而是通过与温度、湿度、光照等多种环境因子对其进行响应^[31],一方面通过制约植被生产力从而对 SOC 的分解及转化产生影响^[32]。本研究表明,不同海拔垂直土层 SOC 含量与土壤温度呈极显著负相关($P<0.01$),与土壤含水量呈极显著正相关($P<0.01$),细根生物量及植被凋落物随土壤含水量的增加而增大,成为土壤表层 SOC 的主要输入来源^[33]。随着海拔升高土壤含水量及凋落物含量显著增加($P<0.05$),增强了微生物活性^[34],而土壤温度随着海拔梯度上升开始降低,使得有机质分解转化速率减慢,增加了 SOC 的累积。本研究中 SOC 含量与土壤含水量之间的相关性高于土壤温度与 SOC 含量间的相关性,这可能是因为在同一气候区内采样时间气温相差不大,处于雨季降水量较多、垂直差异较大有关。

3.3 不同海拔梯度下甜槠天然林土壤有机碳影响因素

相关研究表明,植被群落结构特征与土壤理化性质共同决定了 SOC 的储量,而土壤理化性质对 SOC 的影响要高于植被群落结构特征^[35],这与本研究结果相似。Pearson 相关分析表明,虽然 SOC 含量与土壤理化性质随垂直土层增加存在一定的差异性,但不同海拔垂直剖面 SOC 含量与土壤全氮,有机质均呈极显著($P<0.01$)或显著正相关($P<0.05$),这与相关学者研究一致^[27,30,36]。土壤容重作为土壤物理性质的一个重要指标,

反映了土壤的通气、透水以及松紧程度,能显著影响土壤的持水能力和入渗性能^[37],本研究指出,不同海拔垂直剖面 SOC 含量与土壤容重呈极显著负相关,即土壤土层深度加大,甜槠天然林根系减少,土壤通气性变差,土壤容重也随之增大,这与相关学者研究一致^[5,8,17-18]。这可能是因为甜槠天然林土壤表层植被凋落物丰富,凋落物的分解与积累增加了土壤有机质,使得土壤回还养分增多土壤容重变小;随着土层深度增加,孔隙度变小,土壤水分和有机物质向下输入受到制约^[38],同时土壤透气性变差导致土壤微生物因氧气供给受限而活性减弱,土壤质地紧实容重变大。不同土层 SOC 仅在 20—30 cm 土层与土壤 pH 值呈显著负相关,这与潘忠松^[39]研究结果一致,即马尾松人工林 SOC 含量随 pH 值降低呈增加趋势。主要是因为土壤 pH 值能直接影响矿质元素溶解度,影响土壤中各元素的有效性及迁移转化,随着土壤 pH 值的降低,土壤中微生物活性减弱,同时参与 SOC 循环中的酶活性也受到一定程度的限制^[40],SOC 周转及矿化作用下降,使得 SOC 不断累积。而本研究中土壤 pH 值仅与底层土壤(20—30 cm)显著相关很可能是因为武夷山自然保护区甜槠林表层环境适宜,微生物活性强,土壤全氮及有机质的极显著相关关系可能掩盖了土壤 pH 值对 SOC 累积的影响。本研究表明,土壤细根生物量与 0—20 cm 土层 SOC 呈极显著或显著相关,甜槠天然林在海拔 1022 m 处细根生物量最大,海拔 540 m 处细根生物量最小,这种变化趋势与相关学者研究结果不同,刘建军^[41]在对天然油松锐齿栎林研究发现,随着海拔升高油松锐齿栎林细根生物量显著减少;Davis^[42]对阿巴拉契亚山 5 种典型植被类型细根生物量研究也发现了同样规律,这种差异性可能与植被所处气候带、林分类型以及取样方式不同有关。本研究中海拔 1022 m 处细根生物量最大可能与高海拔甜槠天然林枯枝落叶层较厚,受人为干扰少,而海拔 540 m 处甜槠天然林枯枝落叶层较薄且受人为因素影响较大有关。

土壤机械组成比例能通过其化学保护机制降低土壤 SOC 的分解速率,同时促进土壤 SOC 的固持^[43]。本研究中不同海拔土层土壤粒径组成中粉粒含量随海拔升高而升高,与土壤 SOC 分布特征一致,土壤粘粒含量随海拔升高而降低,与土壤 SOC 分布变化相反,土壤砂粒含量在 0—10 cm 土壤表层随海拔升高逐渐降低,在 10—20、20—30 cm 土层中随海拔增加呈先增加后减小趋势。其中 0—10 cm 土层土壤粒径组成中,粉粒含量与 SOC 的影响最强,可作为衡量土壤表层 SOC 含量的重要因素,这与胡宗达等^[44]对川滇高山栎林土壤 SOC 与不同土层土壤机械组成关系的研究结果一致。表 3 中 0—10 cm 土层土壤 SOC 含量与土壤粘粒及砂粒含量呈显著或极显著负相关,与土壤粉粒呈极显著或显著正相关,20—30 cm 土层土壤砂粒含量与 SOC 呈极显著负相关,印证了以上分析,也与前人研究一致^[45-46]。这可能是因为土壤 SOC,特别是其活性组分会与土壤机械组成中的矿质土粒机械混合,且其中一部分土壤 SOC 会溶解于低分子化合物,部分氨基酸等土壤溶液中,其余一部分则通过生命体方式存在于土壤中^[47]。然而大部分土壤 SOC 是与土壤中的无机成分结合形成有机—无机复合体,一般认为,土壤 SOC 易与土壤颗粒中的粉粒结合,对土壤水分的有效性及其植物生长产生影响,从而影响土壤 SOC 分布^[48]。一方面,由于粉粒颗粒较细,具有较大的表面积,能暴露更多的正电荷位与土壤中带负电荷的腐殖质结合^[49];另一方面,土壤颗粒越细,其通透性越差,一旦与土壤 SOC 结合,即很难被微生物所分解^[46],而砂粒等土壤颗粒较大的土壤组分与粉粒、粘粒刚好相反,其颗粒大,带正电荷位少,不易与土壤 SOC 结合,且通透性强,微生物易分解,因此,土壤 SOC 与砂粒含量呈显著负相关,与粉粒含量呈显著正相关。

SOC 具有明显的空间变异性,即使在土壤质地相同区域内,空间位置的不同也会造成土壤有机碳含量存在显著差异^[50]。本研究揭示了武夷山自然保护区甜槠天然林 SOC 随海拔梯度变化特征及影响 SOC 含量变化的环境因子,不同环境因子组合虽然能解释不同土层 SOC 含量的大部分变异,但仍有部分变异未被解释,因此未来研究应进一步考虑其他因素如坡向、土壤微生物、林龄等因子及其交互作用对 SOC 累积的影响。

参考文献 (References):

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [2] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.

- [3] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏. 伊犁河谷不同植被带下土壤有机碳分布. 地理学报, 2010, 65(5): 605-612.
- [4] 孟苗婧, 张金池, 郭晓平, 吴家森, 赵有朋, 叶立新, 刘胜龙. 海拔变化对黄山松阔叶混交林土壤有机碳组分的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(6): 106-112.
- [5] 丛高, 张志丹, 张晋京, 徐丽, 何念鹏. 长白山不同林型土壤有机碳特征. 水土保持学报, 2019, 33(3): 179-184, 191-191.
- [6] Post W M, King A M, Wullschlegel S D. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon//Powlson D S, Smith P, Smith J U, eds. Evaluation of Soil Organic Matter Models. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996: 201-222.
- [7] Zinn Y L, Andrade A B, Araujo M A, Lal R. Soil organic carbon retention more affected by altitude than texture in a forested mountain range in Brazil. Soil Research, 2018, 56(3): 284-295.
- [8] 郭璐璐, 李安迪, 商宏莉, 孙守琴. 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. 中国农业气象, 2018, 39(10): 636-643.
- [9] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps. Global Change Biology, 2005, 11(7): 1024-1041.
- [10] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, Yang X D, Sha L Q. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation - incubation procedure. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(10): 1923-1928.
- [11] 方燕鸿. 武夷山米槠、甜槠常绿阔叶林的物种组成及多样性分析. 生物多样性, 2005, 13(2): 148-155.
- [12] 王勇. 武夷山自然保护区甜槠林群落结构特征研究. 林业调查规划, 2011, 36(2): 43-46.
- [13] 郎飞. 武夷山甜槠天然林群落结构及碳贮量研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- [14] 刘爱琴, 严加亮, 侯晓龙, 蔡丽平, 邹显花, 苏漳文. 武夷山自然保护区不同海拔土壤磷素的分布规律. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 310-316.
- [15] 范跃新, 谢麟, 陈仕东, 郭剑芬, 杨智杰, 钟小剑, 钟羨芳, 徐玲琳. 温度和湿度对武夷山不同海拔土壤微生物氮的影响. 亚热带资源与环境学报, 2015, 10(2): 9-15.
- [16] 黄桥明, 吕茂奎, 聂阳意, 任寅榜, 熊小玲, 谢锦升. 武夷山不同海拔森林表层土壤轻组有机质特征. 生态学报, 2020, 40(17): 6215-6222.
- [17] 许恩兰, 林雪婷, 郭剑芬. 水分对武夷山不同海拔土壤有机碳矿化的影响. 亚热带资源与环境学报, 2019, 14(1): 30-37.
- [18] 朱鹤健, 林振盛, 陈珍皋, 谭炳华, 郭成达. 武夷山土壤垂直分布和特征. 武夷科学, 1982, 2: 152-164.
- [19] 陈健飞. 武夷山土壤形成特点与系统分类. 土壤通报, 2000, 31(3): 97-101.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 141-149.
- [21] 王会利, 王绍能, 宋贤冲, 秦丽玲, 唐林峰, 叶建平, 曹继钊, 邓小军. 广西猫儿山水青冈林土壤剖面有机碳垂直分布特征及影响因素. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(11): 89-94, 122-122.
- [22] 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. 生态环境学报, 2019, 28(8): 1514-1521.
- [23] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying - rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(6): 777-787.
- [24] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 王少昆. 陆地生态系统凋落物分解研究进展. 草业科学, 2010, 27(8): 44-51.
- [25] 柯炳氨, 张璐, 苏志尧. 粤北亚热带山地森林土壤有机碳沿海拔梯度的变化. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 151-156.
- [26] Han F P, Hu W, Zheng J Y, Du F, Zhang X C. Estimating soil organic carbon storage and distribution in a catchment of Loess Plateau, China. Geoderma, 2010, 154(3/4): 261-266.
- [27] Chen L F, He Z B, Du J, Yang J J, Zhu X. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China. CATENA, 2016, 137: 37-43.
- [28] 张亚茹, 欧阳旭, 褚国伟, 张倩媚, 刘世忠, 张德强, 李跃林. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有机碳和全氮的空间分布. 应用生态学报, 2014, 25(1): 19-23.
- [29] Sheikh M A, Kumar M, Bussmann R W. Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. Carbon Balance and Management, 2009, 4: 6.
- [30] 曹瑞, 吴福忠, 杨万勤, 徐振锋, 谭波, 王滨, 李俊, 常晨晖. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1257-1264.
- [31] 尤海舟, 毕君, 王超, 任启文, 李联地. 河北小五台山不同海拔白桦林土壤有机碳密度分布特征及影响因素. 生态环境学报, 2018, 27(3): 432-437.
- [32] 赵盼盼, 周嘉聪, 林开森, 林伟盛, 袁萍, 曾晓敏, 苏莹, 徐建国, 陈岳民, 杨玉盛. 不同海拔对福建戴云山黄山松林土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响. 生态学报, 2019, 39(8): 2676-2686.
- [33] 林成芳, 郭剑芬, 陈光水, 杨玉盛. 森林细根分解研究进展. 生态学杂志, 2008, 27(6): 1029-1036.

- [34] Xiang S R, Doyle A, Holden P A, Schimel J P. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2281-2289.
- [35] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征. *环境科学*, 2019, 40(3): 1491-1503.
- [36] 庞圣江, 杨保国, 刘士玲, 刘福妹, 张培, 黄柏华. 桂西北喀斯特山区 4 种森林表土土壤有机碳含量及其养分分布特征. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(4): 60-64, 71-71.
- [37] 刘顺, 盛可银, 刘喜帅, 郭晓敏, 张文元. 赣南毛竹林土壤的渗透性特征. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(2): 252-257.
- [38] 张厚喜, 林丛, 程浩, 金昌善, 徐自坤, 魏志超, 马祥庆. 武夷山不同海拔梯度毛竹林土壤有机碳特征及影响因素. *土壤*, 2019, 51(4): 821-828.
- [39] 潘忠松, 丁访军, 戴全厚, 许丰伟. 黔南马尾松人工林土壤有机碳的研究. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(2): 75-80.
- [40] 于秀丽. 莫莫格湿地土壤微生物量碳动态及与酶活性的关系. *东北林业大学学报*, 2020, 48(4): 59-63.
- [41] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 吴钦孝. 火地塘天然油松锐齿栎林细根生物量及其空间变化. *西北林学院学报*, 2004, 19(1): 1-4, 72-72.
- [42] Davis J P, Haines B, Coleman D, Hendrick R. Fine root dynamics along an elevational gradient in the southern Appalachian Mountains, USA. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187(1): 19-33.
- [43] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [44] 胡宗达, 刘世荣, 史作民, 刘兴良, 何飞. 不同海拔梯度川滇高山栎林土壤颗粒组成及养分含量. *林业科学*, 2012, 48(3): 1-6.
- [45] 邓廷飞, 刘彦, 颜秋晓, 何腾兵, 高安勤. 贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 209-214.
- [46] 张华渝, 王克勤, 宋娅丽. 滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤粒径分布对土壤有机碳组分的影响. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(4): 93-100.
- [47] 唐炎林, 邓晓保, 李玉武, 张顺宾. 西双版纳不同林分土壤机械组成及其肥力比较. *中南林业科技大学学报*, 2007, 27(1): 70-75.
- [48] Baumann F, He J S, Schmidt K, Kühn P, Scholten T. Pedogenesis, permafrost, and soil moisture as controlling factors for soil nitrogen and carbon contents across the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2009, 15(12): 3001-3017.
- [49] 赵兴敏, 赵兰坡, 郭欣欣, 李明堂, 于珊珊, 王铭阳. 水体沉积物与岸边土壤颗粒组成及有机碳分布特征. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 304-308.
- [50] 薛志婧, 侯晓瑞, 程曼, 安韶山. 黄土丘陵区小流域尺度上土壤有机碳空间异质性. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 160-163, 168-168.