

武夷山不同海拔梯度毛竹林土壤有机碳特征及影响因素^①

张厚喜^{1,2}, 林 丛^{1,2}, 程 浩^{1,2}, 金昌善³, 徐自坤³, 魏志超^{1,2}, 马祥庆^{1,2*}

(1 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2 海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心, 福州 350002;

3 武夷山国家公园管理局科研监测中心, 福建武夷山 354315)

摘 要: 以武夷山自然保护区的毛竹林土壤(海拔范围为 250 ~ 1 500 m)为研究对象, 选取 5 个海拔梯度的 15 块样地, 分析了毛竹林土壤有机碳沿海拔梯度的分布特征, 探讨了土壤有机碳含量与地形因子、土壤性质的相关关系, 并构建了土壤有机碳的回归模型。结果表明: 武夷山毛竹林土壤有机碳含量变化范围为 13.29 ~ 70.68 g/kg, 且海拔 >500 m 土壤有机碳的分布具有明显的表聚现象; 同一海拔高度内, 毛竹林土壤有机碳含量呈现随土层深度的增加而逐渐降低的趋势, 且其降幅也随之变小; 同一土层深度的土壤有机碳含量大体呈现随海拔的升高而增加的趋势, 而其增幅则随之变小; 不同土层土壤有机碳含量与海拔均呈显著或极显著正相关、与容重均呈极显著负相关, 而仅表层(0 ~ 10 cm)土壤有机碳含量与坡度呈显著负相关; 土壤有机碳多元线性回归模型的拟合优度高于一元线性回归模型, 不同因子组合对不同土层有机碳含量变异的解释量介于 59% ~ 83%。

关键词: 武夷山自然保护区; 毛竹林; 土壤有机碳; 海拔梯度; 多元线性回归模型

中图分类号: S155.4+8 **文献标识码:** A

自工业革命以来, 大气中 CO₂ 等温室气体浓度升高导致的全球气候变暖严重威胁着人类的生存, 而通过增加陆地生态系统碳储量被认为是缓解温室效应的重要措施^[1-2]。森林生态系统是全球陆地生态系统中最大的有机碳库, 占整个陆地有机碳总量的 56%, 在控制大气 CO₂ 浓度方面起着极其关键的作用^[3]。竹林是一种重要的森林生态系统, 与其他林木相比, 竹子具有根鞭系统发达、繁殖能力强、生长速度快的优点。虽然当前全球的森林面积在持续减少, 但竹林面积却以每年 3% 左右的速度在增长, 可见竹林的碳汇潜力巨大^[4]。我国是世界上第一大竹产国, 竹子种类、竹林面积均占全世界的 1/3 左右。毛竹(*Phyllostachy edulis*)是最主要的竹子类型, 据我国第八次森林资源清查结果^[5]显示, 毛竹林面积约有 444.74 万 hm², 占竹林总面积的 74%, 可见毛竹林在全球碳循环过程中扮演着重要的角色。因此, 研究毛竹林生态系统碳库及固碳潜力具有重要的现实意义。

近年来, 关于毛竹林生态系统碳库方面的研究受到了广泛的关注^[6-9], 而土壤作为毛竹林生态系统碳存储的主体^[4,10], 更是成为关注的重点。然而, 由于

毛竹生长环境存在着较大差异, 一方面影响了毛竹的生物量以及输入土壤的有机碳数量, 另一方面也影响了土壤因有机质分解而引起的有机碳输出量, 最终导致土壤中有机碳的累积存在较大差异^[6,9]。因此, 关于毛竹生长环境与土壤碳储量之间的关系还有待深入研究。海拔作为影响竹林立地环境温度与水分的重要因子, 也必然影响着毛竹林土壤有机碳储量的变化, 但与此相关的研究目前还较少。

武夷山国家级自然保护区位于中亚热带地区, 其海拔高差大、人为干扰少, 这种独特的地理环境使得武夷山自然保护区成为生态学界研究者关注的热点, 也使得其成为研究不同生态系统结构等特征的理想场地。因此, 近年来围绕武夷山自然保护区在不同海拔的植被分布特征^[11]、土壤酶活性特征^[12]、土壤微生物群落结构^[13]和土壤氮矿化^[14]等方面做了许多相关研究。然而, 该地区有关毛竹林土壤有机碳在不同海拔分布特征及其影响因素的研究还较缺乏。本文以武夷山自然保护区 5 个不同海拔的毛竹林土壤为研究对象, 通过测定土壤有机碳及其相关理化性质, 分析土壤有机碳沿海拔梯度及沿垂直剖面的分布规律,

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2017J05042)和福建农林大学林学院科学基金项目(61201400822)资助。

* 通讯作者(lxymxq@126.com)

作者简介: 张厚喜(1985—), 男, 福建福州人, 博士, 讲师, 主要研究方向为土壤碳循环。E-mail: zhanghouxi@fafu.edu.cn

探讨影响毛竹林土壤有机碳空间变异的主控因子,进而构建土壤有机碳的回归模型,旨在为武夷山及亚热带地区森林土壤碳汇研究与管理提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区武夷山国家级自然保护区(117°27' ~ 117°51' E, 27°33' ~ 27°54' N)位于福建省西北部,闽赣边境,东西宽 22 km,南北长 52 km,总面积 56 527 hm²。该区以地形地势高、起伏变化大、有垭口为主要特征,区内主峰为黄岗山,其海拔高度为 2 158 m。气候类型为中亚热带季风气候,年均气温 12 ~ 18 ℃,年均相对湿度 82% ~ 85%,年均雾日 100 d 以上,年均降水量约为 2 000 mm^[15-16]。随海拔的升高,土壤垂直地带性分布明显,从低到高土壤类型依次为山地红壤、山地黄红壤、山地黄壤、高山草甸土;沿着海拔不断上升,植被垂直带谱的分布也相当完整,从山麓到山顶植被类型分别为常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、亚高山矮林以及高山草甸^[15-16]。毛竹林是研究区重要的植被类型,其分布的海拔范围较广(250 ~ 1 500 m),毛竹林的经营措施极为粗放,几乎不采用施肥管理措施,以材用林经营为主。

1.2 样地设置及采样方法

2016 年 5 月至 6 月,通过相关资料的查阅和实

地调查,在武夷山自然保护区内按一定的海拔梯度布设毛竹林采样地。本研究按 250 m 的间隔,将 250 ~ 1 500 m 的海拔范围划分成 5 个海拔梯度(表 1)。在每个海拔梯度内选取 3 块毛竹纯林样地(投影面积 10 m×10 m);在每块样地内,随机布设 3 个土壤采样区,并在每个采样区按照 S 型方法布设 5 个土壤采样点;土壤采样利用分层采样法,土壤层次分别为 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 和 30 ~ 40 cm,每个土样为 5 个采样点的混合样;同时,对每个采样区各层土壤采用环刀法(环刀直径为 5 cm)进行取样,共计 180 个非环刀土样和 180 个环刀土样。非环刀土样品带回实验室风干后过 2 mm 筛,用于土壤理化性质的测定;环刀样品则用于土壤容重的测定。利用 GPS(Magellan Explorist 610)记录每块样地的海拔、经度和纬度;在每块样地内,调查记录毛竹株数、胸径、年龄等信息。毛竹林的林下植被主要有:马唐(*Digitaria sanguinalis*)、鸡屎藤(*Paederia scandens*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、蛇葡萄(*Ampelopsis aconitifolia*)、莎草(*Cyperus difformis*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、狗脊(*Blechnum japonica*)、麦门冬(*Liriope spicata*)、山姜(*Alpinia japonica*)、箭叶淫羊藿(*Epimedium sagittatum*)、紫萁(*Osmunda japonica*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、算盘子(*Glochidion puberum*)、欒木(*Loropetalum chinense*)、土茯苓(*Smilax labra*)。

表 1 样地基本信息

序号	海拔(m)	样地数	毛竹密度(株/hm ²)	土壤类型	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
1	250 ~ 500	3	2 900 ± 1 000	红壤	196.8 ± 18.4	3.8 ± 1.2	49.7 ± 11.1
2	500 ~ 750	3	3 300 ± 800	红壤	299.7 ± 22.0	2.4 ± 0.6	63.9 ± 5.4
3	750 ~ 1000	3	2 800 ± 700	山地黄壤	468.8 ± 96.5	12.1 ± 6.3	75.3 ± 19.9
4	1 000 ~ 1 250	3	3 000 ± 400	山地黄壤	635.4 ± 97.0	7.7 ± 1.5	106.1 ± 18.1
5	1 250 ~ 1 500	3	3 200 ± 500	山地黄壤	704.8 ± 43.8	11.7 ± 1.9	117.2 ± 10.8

注:碱解氮、有效磷和速效钾含量来自 0 ~ 10 cm 土壤。

1.3 样品测定与数据分析

本研究主要测定的土壤理化性质包括土壤容重、pH、有机碳、碱解氮、有效磷和速效钾。其中,土壤容重采用环刀法测定,土壤 pH 采用水浸提电极电位法测定(水土比为 2.5 : 1),土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,碱解氮采用扩散吸收法测定,有效磷采用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[17]。

研究区数字高程模型(DEM)数据,其空间分辨率为 30 m,利用 ArcGIS 10.1 对该数据进行样地坡度的

提取;采用 SPSS 22 对不同海拔及不同土层土壤有机碳含量进行单因素方差分析(ANOVA),并基于 Duncan 法进行多重比较以判定差异水平;利用 Excel 2013、Sigmaplot 11.0 和 ArcGIS 10.1 进行图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 同一海拔梯度土壤有机碳垂直剖面分布特征

由表 2 可知,总体而言,在相同海拔梯度内,毛竹林土壤有机碳含量随土层深度的增加而逐渐降低,并且其降幅也随之变小。其中,土壤有机碳含量最高

的为海拔 1 250 ~ 1 500 m 的 0 ~ 10 cm 土壤,其平均值为 70.68 g/kg,而含量最低的是海拔 500 ~ 750 m 范围的 30 ~ 40 cm 土壤,其平均值为 13.29 g/kg。通过计算同一海拔梯度内不同土层有机碳含量变异系数可知,各海拔变异程度的大小排序为 250 ~ 500 m (7.63%)< 500 ~ 750 m(42.34%)<750 ~ 1 000 m (42.68%)<1 000 ~ 1 250 m(28.41%)<1 250 ~ 1 500 m (43.29%),在低海拔梯度(250 ~ 500 m)内,不同深度土层有机碳含量变异系数最小,显著低于其他海拔,表明有机碳在低海拔土壤垂直剖面的分布较均匀。

随着海拔的升高,0 ~ 10 cm 土壤有机碳含量与其他三层之间的差异逐渐增大,在海拔 750 ~ 1 000 m 和 1 250 ~ 1 500 m 梯度内土壤有机碳含量随土层深度变化更明显。除了海拔 250 ~ 500 m,其他 4 个海拔梯度内 0 ~ 10 cm 土层的有机碳含量均显著高于其他土层,表明较高海拔(>500 m)土壤有机碳的分布具有明显的表聚现象。从 4 层土壤有机碳含量的平均值来看,各海拔梯度有机碳含量大小为 500 ~ 750 m (21.98 g/kg)<250 ~ 500 m (23.30 g/kg)<750 ~ 1 000 m (34.45 g/kg)<1 000 ~ 1 250 m (42.38 g/kg)<1 250 ~ 1 500 m (44.25 g/kg)。

2.2 同一土层土壤有机碳不同海拔梯度分布特征
同一土层毛竹林土壤有机碳含量随海拔变化的

特征如表 2 所示。总体而言,对于同一深度的土壤层,有机碳含量随海拔的升高而呈逐渐增加的趋势,但其增幅则随之变小。在 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤中,有机碳含量变化范围分别为 25.69 ~ 70.68 g/kg 和 23.00 ~ 45.37 g/kg;这两层土壤有机碳含量随海拔变化的趋势相似,即在低海拔(<750 m)和高海拔(>750 m)之间其有机碳含量存在显著差异,而在低海拔(<750 m)内或高海拔(>750 m)内则无显著差异。相较于 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层,20 ~ 30 cm 和 30 ~ 40 cm 土层土壤有机碳含量随海拔的变化较小,其范围分别为 16.72 ~ 33.75 g/kg 和 13.29 ~ 27.19 g/kg。通过比较不同土层 5 个海拔土壤有机碳的平均值,可知有机碳含量均值随着土层深度的增加而减小,各土层有机碳含量的大小顺序为 0 ~ 10 cm (48.97 g/kg)> 10 ~ 20 cm (33.93 g/kg)>20 ~ 30 cm (26.46 g/kg)> 30 ~ 40 cm (23.73 g/kg)。通过比较不同土层 5 个海拔土壤有机碳的变异系数,可得到其大小顺序为 0 ~ 10 cm (38.56%)>30 ~ 40 cm (33.65%)>10 ~ 20 cm (32.72%)> 20 ~ 30 cm(29.15%),可见,虽然不同土层有机碳含量的变异并无明显规律,但总体上,表层(0 ~ 10 cm)土壤有机碳含量的变异程度要大于深层土壤。

表 2 不同海拔不同土层土壤有机碳分布特征

海拔(m)	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm
250 ~ 500	25.69 ± 3.52 aB	23.00 ± 4.28 aB	23.13 ± 5.58 aBC	21.39 ± 4.98 aB
500 ~ 750	34.41 ± 0.27 aB	23.51 ± 1.20 bB	16.72 ± 2.20 cC	13.29 ± 1.35 dC
750 ~ 1 000	54.87 ± 11.81 aAB	35.03 ± 5.72 bA	26.33 ± 2.36 bcAB	21.58 ± 2.39 cB
1 000 ~ 1 250	59.20 ± 14.50 aA	42.74 ± 10.89 abA	32.37 ± 8.65 bAB	35.20 ± 2.24 bA
1 250 ~ 1 500	70.68 ± 9.31 aA	45.37 ± 5.93 bA	33.75 ± 3.04 cA	27.19 ± 3.87 cB

注: 同行不同小写字母或同列不同大写字母分别表示同一海拔不同土层间或同一土层不同海拔间存在显著差异($P<0.05$)。

2.3 土壤有机碳含量与地形因子、土壤性质的相关性

为了研究毛竹林土壤有机碳含量变异的主控因子,本研究计算了不同土层有机碳含量与地形因子(坡度和海拔)、土壤性质(pH 和容重)的相关系数(表 3),结果显示,不同土层土壤有机碳含量与海拔均呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关,相关系数随土层深度的加深而减小,变化范围介于 0.63 ~ 0.89;不同土层土壤有机碳含量与容重均呈极显著($P<0.01$)负相关,相关系数随土层深度的加深并无明显变化趋势,变化范围介于-0.76 ~ -0.68。这表明在 0 ~ 40 cm 土层土壤有机碳含量很大程度上依赖于海拔和容重的变化,其含量均随着海拔的升高而增加,随着容重的增大而减小。坡度仅对表层(0 ~ 10 cm)土

壤有机碳含量产生显著影响,即坡度的增大将不利于有机碳在土壤中的累积。虽然不同土层有机碳含量与 pH 相关关系不显著,但当汇总 4 个土层数据再进行相关分析发现,有机碳含量与 pH 呈极显著负相关

表 3 不同土层土壤有机碳含量与地形因子、土壤性质的 Pearson 相关系数

	土壤有机碳			
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm
海拔	0.89**	0.85**	0.72**	0.63*
坡度	-0.62*	-0.47	-0.24	-0.42
pH	-0.23	-0.17	-0.38	-0.42
容重	-0.76**	-0.72**	-0.68**	-0.73**

注: *表示在 $P<0.05$ 水平显著相关, **表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。

($P < 0.01$), 相关系数为 -0.36 , 原因可能是在每个土层内 pH 的差异较小, 使得无法观测到 pH 变化对土壤有机碳含量变化的影响, 而汇总 4 个土层数据后增大了 pH 的变化范围 ($4.02 \sim 5.22$)。利用 4 个土层数据进行综合相关分析, 结果显示, 有机碳含量与容重呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 相关系数为 -0.66 。

2.4 土壤有机碳含量回归模型构建

2.4.1 一元回归模型构建

通过一元线性回归分析, 可分别得到毛竹林不同土层土壤有机碳含量与海拔、容重和坡度的一元线性回归方程。结果显示: 对于表层土壤 ($0 \sim 10$ cm), 基于各个变量的有机碳回归方程均为显著或极显著 (图 1A、B、C); 通过拟合优度 R^2 可知, 海拔、容重和坡度这 3 个变量能分别解释 79.5%、58.0% 和 37.8% 毛竹林土壤有机碳含量的变异。对于 $10 \sim 20$ cm 土层, 基于各个变量的有机

碳回归方程均为极显著 (图 2A、B); 拟合优度 R^2 表明海拔和容重这 2 个变量能分别解释 71.4% 和 51.6% 毛竹林土壤有机碳含量的变异。对于 $20 \sim 30$ cm 土层, 基于各个变量的有机碳回归方程均为极显著 (图 3A、B); 通过拟合优度 R^2 可知, 海拔和容重这 2 个变量能分别解释 51.5% 和 46.6% 毛竹林土壤有机碳含量的变异。对于 $30 \sim 40$ cm 土层, 基于各个变量的有机碳回归方程均为极显著 (图 4A、B); 拟合优度 R^2 表明海拔和容重这 2 个变量能分别解释 39.7% 和 52.3% 毛竹林土壤有机碳含量的变异。将 4 个土层数据汇总后再进行一元线性回归分析, 结果显示 (图 5A、B) 虽然基于各个变量的回归方程均为极显著, 但海拔和容重这 2 个变量仅能分别解释 12.6% 和 43.3% 毛竹林土壤 ($0 \sim 40$ cm) 有机碳含量的变异。

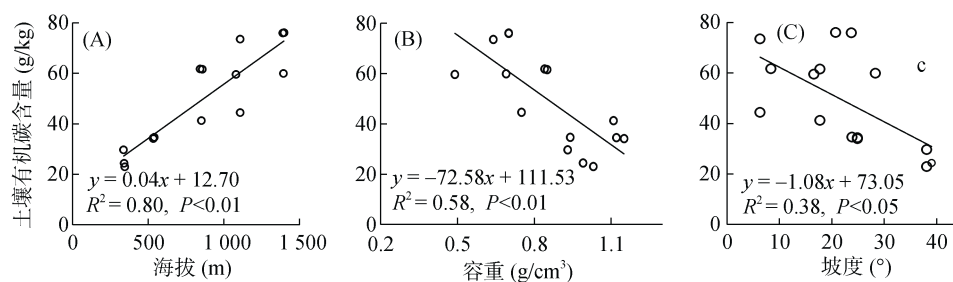


图 1 土壤有机碳 ($0 \sim 10$ cm) 与海拔 (A)、容重 (B) 和坡度 (C) 一元线性回归模型

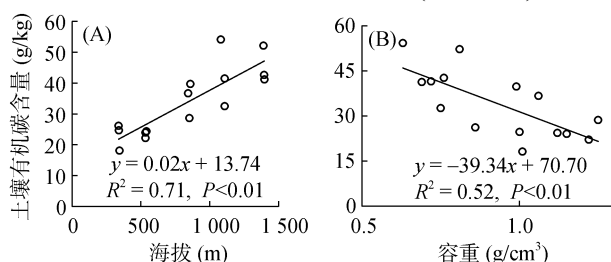


图 2 土壤有机碳 ($10 \sim 20$ cm) 与海拔 (A)、容重 (B) 一元线性回归模型

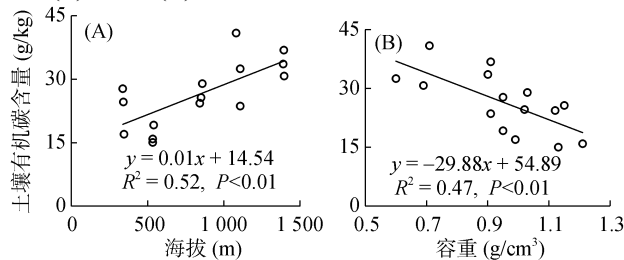


图 3 土壤有机碳 ($20 \sim 30$ cm) 与海拔 (A)、容重 (B) 一元线性回归模型

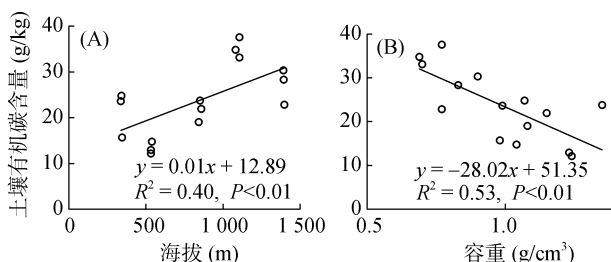


图 4 土壤有机碳 ($30 \sim 40$ cm) 与海拔 (A)、容重 (B) 一元线性回归模型

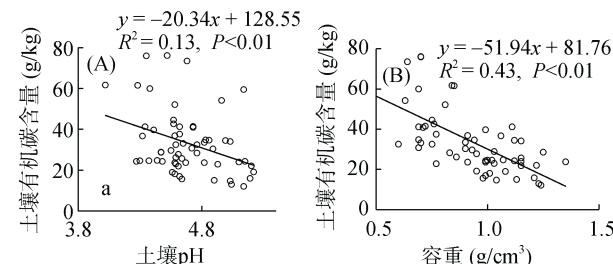


图 5 土壤有机碳 ($0 \sim 40$ cm) 与 pH (A)、容重 (B) 一元线性回归模型

2.4.2 多元回归模型构建

基于回归分析方法, 构建了土壤有机碳含量与各因子之间的多元线性回归模型 (表 4), 结果显示, 对于 $0 \sim 10$ cm 土层, 基于

海拔、容重和坡度这 3 个变量所构建的方程其回归关系达到极显著水平, 3 个因子能共同解释 83% 毛竹林土壤有机碳含量的变异; 对于 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 30$

和 30~40 cm 这 3 个土层,基于海拔和容重这 2 个变量所构建的回归方程的回归关系均达到极显著水平,并且海拔和容重对有机碳含量变异的解释量随土层深度的增加而减小,解释量分别为 76%、63% 和 59%;对于 0~40 cm 整个土壤剖面,基于海拔和容重的回归方程的回归关系达到极显著水

平,这 2 个变量能共同解释 50% 土壤有机碳含量的变异。可见,不同的因子组合能共同解释不同土层大部分有机碳含量的变异。由于不同方程的拟合度都较高,因此利用这些因子即可较为准确地预测武夷山毛竹林土壤有机碳含量的变化,特别是表层土壤。

表 4 不同土层土壤有机碳含量的多元线性回归模型

土层(cm)	回归方程	拟合优度 R^2	P 值
0~10	$SOC = 0.03 \times Alt_i - 18.63 \times BD - 0.29 \times Slp + 44.87$	0.83	0.000
10~20	$SOC = 0.02 \times Alt_i - 16.18 \times BD + 33.43$	0.76	0.000
20~30	$SOC = 0.01 \times Alt_i - 17.91 \times BD + 35.40$	0.63	0.002
30~40	$SOC = 0.01 \times Alt_i - 20.92 \times BD + 38.95$	0.59	0.004
0~40	$SOC = -15.19 \times pH - 48.89 \times BD + 150.04$	0.50	0.000

注:表中 SOC 表示土壤有机碳含量;Alt_i 表示海拔, BD 表示容重, Slp 表示坡度。

3 讨论

3.1 毛竹林土壤有机碳剖面垂直分布的影响因素

本研究显示,武夷山自然保护区毛竹林不同土层(0~40 cm)土壤有机碳含量的变化范围为 13.29~70.68 g/kg,而整个土壤剖面有机碳含量均值的变化范围为 21.98~44.25 g/kg,这与林振清^[9]、陈双林等^[7]、Tian 等^[18]的研究结果较为接近。林振清^[9]研究了位于武夷山脉附近的福建省建瓯市的毛竹林土壤,结果表明在海拔 199~761 m 梯度内土壤(0~40 cm)有机碳含量变化区间为 19.04~34.37 g/kg;陈双林等^[7]研究了福建省华安市的毛竹林土壤,结果显示在海拔 200~800 m 梯度内土壤(0~30 cm)有机碳含量变化范围是 12.86~15.33 g/kg。虽然本研究区与林振清^[9]、陈双林等^[7]的研究区都属于亚热带气候,但本研究的有机碳含量变化范围相对较大,主要原因是本研究中毛竹林样地的海拔跨度(250~1 500 m)大于他们的海拔跨度(199~800 m),使得本研究中包含了土壤有机碳含量相对较高的高海拔样地。

另外,毛竹林有机碳含量在土壤剖面上呈现随土层加深而降低的分布规律(表 2),特别在海拔>500 m 区域出现了土壤有机碳表聚的现象,这与已有的研究结果相似^[6, 19-20]。原因是毛竹的枯枝落叶等凋落物和鞭根系统大都集中于表层或浅层土壤,分解后形成的腐殖物质主要在土壤表层累积^[6, 21]。另外,通过比较不同土层 5 个海拔梯度土壤有机碳含量的变异系数可知,毛竹林表层(0~10 cm)土壤有机碳含量的变异程度(变异系数为 38.56%)要大于深层土壤(变异系数范围为 29.15%~33.65%)(表 2),这一方面是由于表层土壤有机碳的来源比较多,而不同海拔的表层土壤

有机质的输入量差异比较大;另一方面是由于表层土壤的有机碳含量相对较高,也容易受环境(如凋落物输入、土壤侵蚀)的影响,而随着土层的加深,环境对有机碳含量的影响则逐渐减弱^[21]。

3.2 毛竹林土壤有机碳不同海拔分布的影响因素

研究表明,武夷山自然保护区毛竹林土壤有机碳的分布特征与地形因子密切相关,其中海拔是最重要的因子。不同土层(0~40 cm)有机碳含量随着海拔升高呈逐渐增加的趋势,这与林振清^[9]、陈双林等^[7]、Tian 等^[18]的研究结果一致。土壤中有有机碳的累积主要取决于土壤有机物质输入量(如植被凋落物、根系、动物及微生物残体等)与土壤有机物质输出量(以土壤微生物分解作用为主)的大小^[22-23],而这两个方面均会受到自然因素(如气候、地形和植被等)和人为因素(采伐、翻耕、施肥等)的影响,而在不同空间尺度上其主控因子存在着较大差别^[24-25]。对于山地生态系统,海拔被认为是影响土壤有机碳累积最重要的因素之一^[26-28]。海拔并非直接改变土壤中的有机碳含量,而是通过改变气候环境条件来影响有机质的周转速度,从而间接影响土壤有机碳的含量^[26-29]。对于武夷山,海拔高度每上升 100 m,气温下降 0.44℃,而降水量则增加 37.00~54.14 mm^[16]。然而,武夷山的降水量(年均降水量约为 2 000 mm)比较丰富,因此温度成为影响有机质分解过程的主要因子。随着海拔的升高,温度逐渐降低,土壤酶活性和微生物活性受到抑制,从而降低有机质的分解强度,因而有利于有机碳在土壤中的累积^[23, 26-27]。

坡度也是影响土壤有机碳含量变化的另一重要地形因子,尤其对武夷山自然保护区毛竹林表层土壤(0~10 cm),其有机碳含量与坡度呈显著线性负相

关。很多研究也报道了相似的结果,即坡度越小土壤有机碳含量越大^[30-31]。Grimm 等^[30]的研究显示土壤有机碳含量最低的位于中坡,而有机碳含量最高的则位于坡度较缓的坡脚。他们认为坡度越陡,流水侵蚀作用也越强烈,土壤中的有机质等物质越容易流失,这直接降低了土壤中有机碳含量;另外,坡度陡的地方,通常土壤浅薄,水分条件也差,不利于毛竹的生长,从而减少了凋落物等有机物向土壤的输入量,进而间接降低了土壤有机碳含量。本研究中坡度只与表层土壤(0~10 cm)有机碳含量有显著相关性,原因可能是流水侵蚀作用主要发生土壤表层,而随着土层的加深,其作用减弱,因此坡度对深层土壤(20~40 cm)有机碳含量的影响不显著。另外,与高海拔相比,低海拔(250~500 m)土壤有机碳在不同土层的分布较均匀(表 2),未出现表聚的现象,原因主要是该海拔梯度内样地的坡度(38.09°~39.01°)显著大于高海拔(>500 m)的坡度(6.29°~28.28°),导致表层有机碳因侵蚀作用而产生的流失量较大,降低了表层土壤有机碳含量,从而使得表层土壤有机碳含量与深层无显著差异。

本研究显示,土壤容重表现出随土层深度增加而增大的趋势,与有机碳含量的变化趋势相反,这与其他研究的结果类似^[32-34]。由于林地土壤表层累积了大量的凋落物及根系,腐烂的凋落物进入土壤表层,导致土壤表层变得疏松,从而容重变小;而随着土层的加深,土壤的孔隙度变小,土体变得紧实致密,容重变大^[33]。另外,本研究表明土壤酸碱度对毛竹林土壤有机碳含量变化有着十分重要的影响,即随着 pH 的降低,土壤有机碳含量呈增加趋势。其他研究也报道了类似的结果^[21, 35-36],原因在于随着土壤 pH 的降低,土壤微生物的活性以及参与有机碳循环的酶活性受到了抑制^[37],降低了有机质矿化作用的强度,从而导致有机碳在土壤中不断累积^[35-36]。

4 结论

1) 在武夷山自然保护区同一海拔高度内,毛竹林土壤有机碳含量随土层深度的增加大体呈逐渐降低的趋势,且较高海拔(>500 m)土壤有机碳的分布具有明显的表聚现象;同一土层深度的毛竹林土壤有机碳含量大体呈现随海拔的升高而增加的趋势。

2) 毛竹林土壤有机碳含量与主要环境因子相关分析结果表明,海拔和容重对所有土层(0~40 cm)有机碳含量均有显著影响,而坡度仅对表层(0~10 cm)土壤有机碳含量有显著影响,其中海拔的影响最大。

多元线性回归分析结果显示,3 个主要环境因子联合解释了武夷山毛竹林不同土层有机碳含量变异的 59%~83%。

致谢:本研究得到武夷山国家公园管理局的全力支持,采样工作得到福建农林大学 Syed M. Nizami 博士和罗萧同学的大力帮助,在此深表感谢!

参考文献:

- [1] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173
- [2] 杨玉盛, 陈光水, 谢锦升, 等. 中国森林碳汇经营策略探讨[J]. *森林与环境学报*, 2015, 35(4): 297-303
- [3] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190
- [4] 王兵, 魏文俊, 邢兆凯, 等. 中国竹林生态系统的碳储量[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1680-1684
- [5] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[J]. *林业资源管理*, 2014(1): 1-2
- [6] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布[J]. *林业科学*, 2004, 40(6): 20-24
- [7] 陈双林, 郭子武, 杨清平. 毛竹林土壤酶活性变化的海拔效应[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 529-533
- [8] 刘顺, 吴珍花, 盛可银, 等. 江西毛竹林土壤理化性质与养分吸附特性[J]. *森林与环境学报*, 2016, 36(2): 195-202
- [9] 林振清. 海拔影响毛竹林土壤有机碳组成的研究[J]. *竹子学报*, 2016, 35(2): 26-29
- [10] 张厚喜, 庄舜尧, 季海宝, 等. 我国南方毛竹林生态系统碳储量的估算[J]. *土壤*, 2014, 46(3): 413-418
- [11] 徐欢欢. 武夷山自然保护区植被垂直分布与特征[J]. *武夷科学*, 2007(1): 177-180
- [12] 金裕华, 汪家社, 李黎光, 等. 武夷山不同海拔典型植被带土壤酶活性特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 1955-1961
- [13] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 等. 武夷山不同海拔植被带土壤微生物 PLFA 分析[J]. *林业科学*, 2014, 50(7): 105-112
- [14] 徐宪根, 周焱, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔高度土壤氮矿化对温度变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(7): 1298-1302
- [15] 朱鹤健. 武夷山土壤垂直分布和特征[J]. *武夷科学*, 1982(2): 150-163
- [16] 陈健飞. 武夷山土壤分类参比[J]. *土壤*, 1999, 31(3): 38-39
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 146-226
- [18] Tian G, Justicia R, Coleman D C, et al. Assessment of soil and plant carbon levels in two ecosystems (woody bamboo and pasture) in montane Ecuador[J]. *Soil Science*, 2007, 172(6): 459-468

- [19] 漆良华, 范少辉, 杜满义, 等. 湘中丘陵区毛竹纯林、毛竹-杉木混交林土壤有机碳垂直分布与季节动态[J]. 林业科学, 2013, 49(3): 17–24
- [20] 李翀, 周国模, 施拥军, 等. 不同经营措施对毛竹林土壤有机碳的影响[J]. 林业科学, 2015, 51(4): 26–35
- [21] 杜满义, 封焕英, 范少辉, 等. 闽西毛竹林不同施肥处理下土壤有机碳含量垂直分布与季节动态[J]. 林业科学, 2017, 53(3): 12–20
- [22] Wiesmeier M, Prietzel J, Barthold F, et al. Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria) –Implications for carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 295(5): 162–172
- [23] Longbottom, T L, Townsend-Small, A, Owen, L A, et al. Climatic and topographic controls on soil organic matter storage and dynamics in the Indian Himalaya: Potential carbon cycle-climate change feedbacks[J]. Catena, 2014, 119(8): 125–135
- [24] Powers J S, Schlesinger W H. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica[J]. Geoderma, 2002, 109 (3/4): 165–190
- [25] 郭治兴, 袁宇志, 郭颖, 等. 基于地形因子的土壤有机碳最优估算模型[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 331–343
- [26] Tsui C C, Tsai C C, Chen Z S. Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan[J]. Geoderma, 2013, 209/210(11): 119–127
- [27] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 477–489
- [28] 张继平, 张林波, 王风玉, 等. 井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化[J]. 土壤, 2014, 46(2): 262–268
- [29] Conant R T, Ryan M G, Agren G I, et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates—Synthesis of current knowledge and a way forward[J]. Global Change Biology, 2011, 17(11): 3392–3404
- [30] Grimm R, Behrens T, Märker M, et al. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—Digital soil mapping using Random Forests analysis[J]. Geoderma, 2008, 146(1/2): 102–113
- [31] Oueslati I, Allamano P, Bonifacio E, et al. Vegetation and topographic control on spatial variability of soil organic carbon[J]. Pedosphere, 2013, 23 (1): 48–58
- [32] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1872–1878
- [33] 曹小玉, 李际平. 杉木林土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关性分析[J]. 林业资源管理, 2014(6): 104–109
- [34] 冯锦, 崔东, 孙国军, 等. 新疆土壤有机碳与土壤理化性质的相关性[J]. 草业科学, 2017, 34(4): 692–697
- [35] 许信旺, 潘根兴, 曹志红, 等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素[J]. 地理研究, 2007, 26(6): 1077–1086
- [36] 吴建平, 陈小梅, 褚国伟, 等. 南亚热带森林土壤有机碳组分对模拟酸雨的早期响应[J]. 广西植物, 2015, 35(1): 61–68
- [37] 许第发, 钟天祥, 徐冬梅, 等. 酸沉降对土壤地球化学过程的影响[J]. 地质地球化学, 2002, 30(4): 68–74

Variation of Soil Organic Carbon Content of Moso Bamboo Forest Along Altitudinal Gradient in Wuyi Mountain in China

ZHANG Houxi^{1,2}, LIN Cong^{1,2}, CHENG Hao^{1,2}, JIN Changshan³, XU Zikun³,
WEI Zhichao^{1,2}, MA Xiangqing^{1,2*}

(1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China ; 2 Collaborative Innovation Center of Soil and Water Conservation in Red Soil Region of the Cross-Strait, Fuzhou 350002, China; 3 Scientific Research Monitoring Center, Administration Bureau of National Park of Wuyi Mountain, Wuyishan, Fujian 354315, China)

Abstract: In this study, the moso bamboo (*Phyllostachy edulis*) forest soils from various altitudes (250 ~ 1 500 m) in Wuyishan Nature Reserve were chosen as the research object. The distribution characteristics of soil organic carbon were analyzed in 15 plots along five altitudinal gradients. The correlation between soil organic carbon content and topographic factors or soil properties was discussed, and the regression models of soil organic carbon were constructed. The results showed that: 1) The content of soil organic carbon varied from 13.29 g/kg to 70.68 g/kg, and the distribution of soil organic carbon at elevation >500 m was characteristic of obvious surface accumulation; 2) During the same altitude gradient, the content of soil organic carbon in the moso bamboo forest showed a decreasing trend with the increase of soil depth, and the decreasing amplitude declined accordingly; 3) Soil organic carbon content in the same soil depth generally increased with the altitude, but the increase rate decreased accordingly; 4) Soil organic carbon content in different soil layers was significantly positively correlated with altitude and negatively correlated with bulk density, and it was significantly negatively correlated with slope only in the surface layer (0–10 cm); 5) The goodness of fit of multiple linear regression model was higher than that of univariate linear regression model. The explanations of combination of different factors for the variation of organic carbon content in different soil layers ranged from 59% to 83%.

Key words: National Nature Reserve of Wuyi Mountains; Moso bamboo forest; Soil organic carbon; Altitudinal gradient; Multivariable linear regression model