

Study on Spatial Variability of Soil Organic Carbon in Subtropical Forest of Lushan

Zhaofeng Yu, Zhongqi Zhang, Fazhan Yu*, Yongbing Shan

School of Geography, Geomatics, and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu
Email: 1446340021@qq.com, *yufazhan@126.com

Received: Dec. 28th, 2019; accepted: Jan. 10th, 2020; published: Jan. 17th, 2020

Abstract

Investigating the forest soil organic carbon (C) spatial variation characteristics is of great significance for accurately evaluating forest ecosystem C storage. Taking the typical forest soil on the south and north slope of Lushan in the subtropical region as the research subject, systematic research was carried out to study the profile variation characteristic of forest soil organic C in this area. The results show that: 1) The soil organic C content in the south slope of the whole soil layer (0 - 60 cm) in Lushan forest soil was higher than that on the north slope; the soil organic C content on the north slope showed an upward trend with the increase of altitude, while the regularity of soil on the south slope didn't perform obviously. 2) The distribution of soil organic C density in the whole soil layer on the north slope was positively correlated with the altitude, while the south slope had no obvious regularity. 3) The organic C content of forest soils on the north and south slopes decreased with the increase of soil depth, and the soil organic C content of the bottom layer (40 - 60 cm) was less affected by altitude and soil type. 4) The organic C content in the surface layer (0 - 20 cm) of the high-altitude forest in the north and south slope was higher than that in the low altitude; the difference of soil organic C content in the altitude gradient was significantly lower than that in the soil profile. 5) The soil organic C density in the subtropical forests of Lushan was lower than average of the national and world, but it is still an important soil C pool in China's forest ecosystem.

Keywords

Forest Soil, Soil Organic Carbon, Altitude, Profile Variation, Lushan

庐山亚热带森林土壤有机碳空间变异特征研究

于兆丰, 张忠启, 于法展*, 单勇兵

江苏师范大学, 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州
Email: 1446340021@qq.com, *yufazhan@126.com

*通讯作者。

收稿日期：2019年12月28日；录用日期：2020年1月10日；发布日期：2020年1月17日

摘要

研究森林土壤有机碳空间变异特征对准确评价森林生态系统碳储量具有重要意义。以亚热带地区的庐山南北坡典型森林土壤为研究对象，系统研究该地区森林土壤有机碳的剖面变化特征。结果表明：1) 庐山森林土壤整个土层(0~60 cm)南坡土壤有机碳含量高于北坡；北坡土壤有机碳含量随着海拔高度的上升呈现增加的趋势，而南坡土壤表现规律不明显。2) 北坡整个土层土壤有机碳密度分布与海拔呈正相关，南坡则没有明显的规律。3) 南北坡各森林土壤的有机碳含量随土层深度增加而整体呈降低趋势，且底层(40~60 cm)土壤有机碳含量受海拔和土壤类型的影响较小。4) 南北坡高海拔森林土壤表层(0~20 cm)有机碳含量高于低海拔；在海拔梯度上所表现出来的土壤有机碳含量的差异明显低于在土壤剖面上的差异。5) 庐山亚热带森林土壤有机碳密度低于全国和世界平均水平，但依然是我国森林生态系统重要的土壤碳库。

关键词

森林土壤，土壤有机碳，海拔，剖面变化，庐山

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤有机碳是陆地生态系统中最大的碳库，森林土壤有机碳是陆地土壤有机碳库的重要组成部分，土壤有机碳库的轻微变动可能对大气中温室气体的浓度以及全球变化产生重要影响。无论是在全国尺度还是省域尺度上，土壤中的有机碳具有较高的区域变异性[1]，特别是，受气候、降水、林分类型、地形等因子的综合影响，不同的山地森林植被下土壤有机碳具有更大的空间变异性[2]。因此，全面、准确地理解森林土壤有机碳的变化过程及其影响因素，有助于准确评估森林碳储量和生态服务功能，对制定应对全球气候变化的策略和措施具有重要的理论和现实意义。

由于土壤有机碳空间分异在森林土壤碳研究方面的重要地位，国内外学者对此问题开展了大量研究。首先，在影响森林土壤有机碳分异的环境因子方面，对不同区域的森林土壤的影响因子开展了研究[3]-[9]；其次，在区域森林土壤有机碳的分布格局研究上，通过对不同区域的林地土壤有机碳含量进行了对比分析[10] [11] [12] [13] [14]；此外，在山地森林土壤有机碳垂直分异研究方面做了一定研究[15] [16] [17]。目前对森林土壤有机碳的研究多集中在其影响因子和区域差异对比上，而山地森林土壤的垂直分异研究相对较少，且以种植植被在不同海拔上的土壤有机碳含量差异为主，对于森林植被垂直分异明显的山地森林土壤的系统研究还有待进一步加强。鉴于此，本研究以亚热带地区的庐山典型森林土壤为研究对象，在山体南、北坡分别设置5个不同海拔采样点，系统研究该地区森林土壤有机碳空间分异特征，旨在查明山地森林土壤有机碳密度的空间分异规律，为准确评估亚热带山地森林碳储量以及生态服务功能提供科学参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

庐山位于江西省北部，距九江市约13 km，东及东南临鄱阳湖，是长江中下游平原的交界地带[18]。

地理坐标为东经 115°50'~116°10', 北纬 29°28'~30°53', 总面积 30,493 hm², 主峰大汉阳峰海拔 1473.8 m (图 1)。庐山地处亚热带东部季风区域, 具有鲜明的季风气候特征; 而且庐山是一座中山, 受海拔高度因素的影响, 与周围平原地区相比较, 具有鲜明的山地气候特征。典型植被类型比较齐全, 逆行演替和顺向演替具有一定的代表性, 主要植被类型有亚热带常绿阔叶林和常绿-落叶阔叶混交林, 此外还有亚热带竹林、亚热带针叶林(黄山松林和马尾松林)、落叶阔叶林、针阔混交林; 植被类型与土壤发育相匹配, 从山麓到山顶发育有红壤和黄壤(亚热带基带土壤)、山地黄壤、山地黄棕壤和山地棕壤。

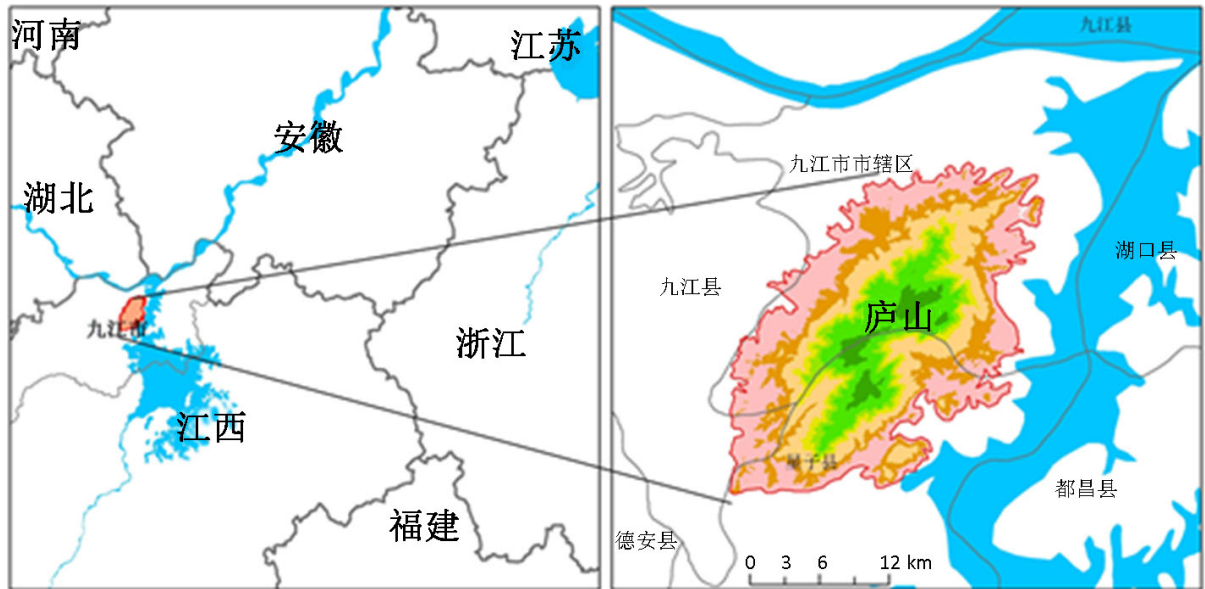


Figure 1. Specific location of each test plots in Lushan
图 1. 研究区位置图

2.2. 样地设置与测试方法

在庐山山体的南坡和北坡分别选择具有一定代表性并能反映其植被覆盖状况的两条样带, 在每 200 m 梯度内选取典型地段随机设置 5 × 5 m 的样地(南北坡两条样带各 5 块), 每块样地内各随机挖取 3 个土壤剖面, 剖面深度随土壤发生层次而定, 按 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 三个土层各采集 200 g 的土壤样品。庐山各测试样地的基本概况见表 1。石砾体积的测算采用排水法, 土壤容重的测定采用环刀法, 土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾法, 具体测试方法参照《土壤农业化学分析方法》[19]。

Table 1. General situation of each test plots in Lushan
表 1. 庐山各测试样地的基本概况

取样位置	海拔(m)	植被类型	土壤类型	坡度(°)	郁闭度	坡向
北坡	250	马尾松林	红壤	10~15	0.7	NE
	450	常绿阔叶林	红壤	15~20	0.9	NW
	650	竹林	黄壤	15~25	—	NW
	850	常-落混交林	山地黄壤	30~40	0.8	NE
	1050	针阔混交林	山地黄棕壤	20~25	0.5	NW

Continued

	350	常绿阔叶林	黄壤	15~20	0.8	SW
	550	针阔混交林	红壤	15~25	0.6	SE
南坡	750	竹林	黄壤	25~30	—	SW
	950	常-落混交林	山地黄壤	20~25	0.6	SE
	1150	黄山松林	山地黄棕壤	35~40	0.4	SW

2.3. 数据计算与处理方法

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量, 一般用 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 由于它以土体体积作为基础计算, 排除了面积和土壤深度的影响, 因此已成为评价和衡量土壤中有有机碳储量的一个极其重要指标[20] [21]。根据土壤容重及土壤有机碳含量计算土壤有机碳密度, 某一土层有机碳密度的计算公式为:

$$SOCD_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100$$

式中: $SOCD_i$ —— i 土层土壤有机碳密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$); C_i ——土壤有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); D_i ——土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); E_i ——土层厚度(cm); G_i ——直径 ≥ 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%). 所有数据均为各处理结果的平均值; 海拔和坡向对土壤剖面各层有机碳含量和有机碳密度影响采用双因素方差分析; 同一坡向不同海拔及相同海拔不同坡向土壤剖面总有机碳密度的差异均采用单因素方差分析; 并利用线性相关分析土壤各层有机碳含量、有机碳密度, 统计分析在 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件上完成。

3. 结果与讨论

3.1. 不同海拔梯度森林土壤有机碳含量的剖面变化

南北坡不同海拔及不同土层下土壤有机碳含量见表 2。由表 2 可知, 整个土层(0~60 cm)南坡土壤有机碳含量高于北坡; 北坡土壤有机碳含量随着海拔高度的上升呈现增加的趋势, 而南坡土壤有机碳含量在 750 m 以下随海拔高度的上升而增加, 750 m 以上表现规律不明显。在表层(0~20cm)分布上, 南北坡高海拔森林土壤表层有机碳含量高于低海拔, 其中, 竹林地表层土壤有机碳含量最高($23.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 马尾松林地表层最低($17.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。海拔对土壤有机碳的影响可能表现在两个方面: 一方面, 不同的海拔发育了不同的森林植被, 植被类型的差异导致了凋落物的质和量以及根系作用的差异, 最终导致进入土壤的有机碳含量的差异; 研究表明, 在气候条件相同的情况下, 森林植被类型对凋落物的产量和分解速率均有显著影响, 进而造成不同森林植被类型间土壤有机碳的差异[6]。另一方面, 随海拔的上升, 温度下降, 林下土壤微生物活性减弱, 使土壤有机碳释放速率降低。

在剖面变化上, 土壤有机碳含量随着土层的加深而减小(表 2), 表现出明显的表层富集性特征, 这与以前的研究结果一致[6] [22] [23]。土壤有机碳的表层富集性特征可能源于表层凋落物的输入、土壤毛管作用力以及根系吸水力的驱使。但是, 表层土壤有机碳的稳定性极容易受集中降水和人类活动的扰动, 容易引起表层水土流失从而导致土壤有机碳储量减少。从亚表层(20~40 cm)来看, 随着海拔的升高, 南北坡各森林土壤亚表层土壤有机碳含量基本呈上升趋势, 这与土壤表层保持一致; 从底层(40~60 cm)土壤来看, 土壤有机碳含量受海拔和土壤类型的影响较小, 南北坡各森林土壤底层有机碳含量均较低并且差别不大。南北坡各森林土壤的有机碳含量随土层深度增加而整体呈降低趋势, 且底层土壤变化速率的差异较亚表层更为明显。由此可见, 森林土壤有机碳主要来自于森林枯枝落叶层的分解输入与累积, 不同化学组成的森林植被使其土壤性质存在一定的差异, 但是, 决定土壤有机碳的分解速率主要是凋落物的结构组成和数量。

在不同海拔梯度上, 南北坡各森林土壤表层有机碳含量存在着差异, 即高海拔森林表层土壤有机碳

含量高于低海拔土壤，但是，在海拔梯度上的所表现出来的土壤有机碳含量的差异明显低于土壤有机碳含量在土壤剖面上的差异(表 2)。这表明土层深度和海拔都是影响土壤有机碳分布的重要因素，但是，土层深度相较于海拔对土壤有机碳空间分布的影响可能会更大。

Table 2. Variation of soil organic carbon content along altitudinal gradient and soil depth on southern and northern slopes of Lushan (mean \pm SD $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

表 2. 庐山南北坡不同海拔及不同土层下土壤有机碳含量(平均值 \pm 标准差 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

地理位置	海拔(m)	土层(cm)			
		0~20	20~40	40~60	0~60
北坡	250	17.74 \pm 5.56a	6.78 \pm 2.62b	3.51 \pm 0.62a	9.72 \pm 3.10a
	450	19.17 \pm 6.17a	8.14 \pm 2.68a	2.37 \pm 0.75a	9.93 \pm 1.53b
	650	22.23 \pm 3.85b	13.16 \pm 4.35a	4.43 \pm 0.24ab	14.74 \pm 2.90a
	850	20.01 \pm 4.60ab	10.58 \pm 3.62a	3.45 \pm 1.09a	11.39 \pm 3.84a
	1050	19.34 \pm 6.23a	9.28 \pm 3.47a	2.97 \pm 0.43bc	10.87 \pm 4.81a
南坡	350	18.75 \pm 5.85a	8.15 \pm 4.52a	3.38 \pm 1.09a	10.49 \pm 4.07b
	550	21.06 \pm 4.43a	12.19 \pm 3.89a	4.59 \pm 3.77b	11.37 \pm 3.65a
	750	23.51 \pm 2.08c	15.83 \pm 2.48b	6.41 \pm 2.36ab	15.67 \pm 4.18bc
	950	19.28 \pm 3.29a	9.78 \pm 4.75a	3.18 \pm 1.98a	10.24 \pm 2.16a
	1150	20.36 \pm 6.92a	11.82 \pm 4.86a	2.21 \pm 0.56ac	12.36 \pm 4.05a

注：同列数字后不同小写字母表示 $p < 0.05$ 水平差异显著。

3.2. 不同海拔梯度森林土壤有机碳密度的剖面变化

土壤有机碳密度是评价土壤碳分布的一个重要指标[24]，南北坡不同海拔及不同土层下土壤有机碳密度见表 3。由表 3 可知，南北坡各森林土壤表层(0~20 cm)土壤有机碳密度存在明显的差异，其中针叶林(马尾松和黄山松)下表层土壤有机碳密度最小，这是由于针叶林的针状凋落物表层的角质层物质腐烂和进入土壤较慢，从而影响了林下土壤微生物活性，造成针叶林下土壤有机碳密度较低，其整体固碳能力较弱。南北坡各森林土壤亚表层(20~40 cm)土壤有机碳密度整体上低于表层土壤，各森林土壤底层(40~60 cm)土壤有机碳密度均出现降低，但其降幅的波动性较大。土壤有机碳密度与气候、植被、地形等环境变量密切相关，已有研究认为土壤有机碳是进入土壤的生物残体等有机物质的输入与以土壤微生物分解作用为主的有机物质的损失之间的平衡[25]，其中，有机物质的输入量在很大程度上取决于气候条件、土壤水分状态、养分的有效性、植被生长以及人类的耕种管理等因素，而土壤中有有机物质的分解速率则受制于有机物的化学组成、土壤水热状况以及物理化学特性等因素[26] [27]。受气候、植被和地形等因素的综合影响，不同海拔梯度森林土壤有机碳密度存在较大的差异。

由表 3 中南北坡各森林土壤整个土层(0~60 cm)有机碳密度与海拔的关系可知：北坡森林土壤有机碳密度表现为随海拔的上升，土壤有机碳密度呈逐渐增加的趋势，说明庐山北坡土壤有机碳密度分布与海拔呈正相关性；庐山南坡森林土壤有机碳密度与海拔则没有明显的规律。在同一海拔高度无论南、北坡，庐山各森林土壤随着土层深度的增加，土壤有机碳密度整体上呈递减趋势。不同海拔上发育的不同森林植被类型，具有不同的树种组成和根际微环境。森林植被类型或树种组成直接影响着凋落物的产量和质量，影响着植被凋落物的分解输入；不同的森林植被类型可能具有不同的林下微气候环境和根际微环境，林下微气候环境和根际微环境影响着土壤微生物活动，同时也具有不同的根分泌物的输入，影响着土壤

本身呼吸作用的碳输出。已有研究表明, 植被凋落物的分解输入和土壤本身呼吸作用的输出的大小和二者的对比关系很大程度上决定了土壤有机碳库的大小和赋存状态[28] [29] [30], 进而造成不同森林类型间土壤有机碳密度的较大差异[31]。

Table 3. Variation of soil organic carbon density along altitudinal gradient and soil depth on southern and northern slopes of Lushan (mean \pm SD $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)

表 3. 庐山南北坡不同海拔及不同土层下土壤有机碳密度(平均值 \pm 标准差 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)

地理位置	海拔(m)	土层(cm)			
		0~20	20~40	40~60	0~60
北坡	250	3.75 \pm 0.81ac	2.31 \pm 0.62b	3.15 \pm 1.05a	8.17 \pm 2.01ac
	450	5.13 \pm 1.21a	3.64 \pm 1.45a	1.79 \pm 0.49b	10.04 \pm 4.27a
	650	7.81 \pm 3.06b	4.87 \pm 0.56a	2.96 \pm 1.43a	12.39 \pm 2.02ab
	850	6.65 \pm 1.37a	3.59 \pm 2.33a	2.61 \pm 0.26a	12.95 \pm 3.53a
	1050	6.37 \pm 2.89a	4.04 \pm 1.52ac	2.84 \pm 0.93a	13.71 \pm 4.62a
南坡	350	5.33 \pm 1.69a	3.19 \pm 0.64a	3.57 \pm 1.84a	11.56 \pm 2.81a
	550	4.69 \pm 1.23a	3.14 \pm 1.97a	3.89 \pm 1.21ab	10.91 \pm 5.57a
	750	7.67 \pm 2.58b	4.78 \pm 2.57b	2.41 \pm 0.89a	12.87 \pm 4.12a
	950	5.92 \pm 1.04a	3.87 \pm 0.85a	4.01 \pm 1.53a	13.09 \pm 2.34a
	1150	4.13 \pm 3.39a	2.61 \pm 0.71bc	2.49 \pm 0.61a	9.35 \pm 3.96b

注: 同列数字后不同小写字母表示 $p < 0.05$ 水平差异显著。

庐山亚热带主要森林土壤有机碳密度为 8.17~13.71 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 其土壤有机碳密度低于全国森林土壤平均水平(19.36 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) [32], 也低于世界平均水平(18.90 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) [33]。这主要是庐山属于我国亚热带东部季风区域, 地处长江中下游平原的分界处, 亚热带较好的水热条件有利于植被生物量的积累, 同时亚热带土壤呼吸速率较大, 加之植被对土壤中养分大量吸收, 造成土壤碳储量相对较低[32], 另外, 人类对森林资源的开发以及不合理的干扰, 容易造成水土流失, 加速了森林土壤有机碳的释放。

4. 主要结论

1) 庐山南坡(0~60 cm)森林土壤有机碳含量高于北坡; 北坡土壤有机碳含量随着海拔高度的上升呈现增加的趋势, 而南坡土壤表现规律不明显。南北坡各森林土壤的有机碳含量随土层深度增加而整体呈降低趋势, 且底层(40~60 cm)土壤有机碳含量受海拔和土壤类型的影响较小。

2) 在不同海拔梯度上, 表层(0~20 cm)土壤有机碳含量存在着差异, 南北坡高海拔森林土壤有机碳含量高于低海拔土壤表层有机碳含量, 但是, 在海拔梯度上所表现出来的差异明显低于在土壤剖面上的差异。

3) 庐山北坡(0~60 cm)森林土壤有机碳密度分布与海拔呈正相关, 南坡森林土壤有机碳密度与海拔则没有明显的规律。南北坡各森林土壤表层有机碳密度存在明显的差异, 亚表层(20~40 cm)土壤有机碳密度整体上低于表层土壤, 底层土壤有机碳密度均出现降低, 但其降幅的波动性较大。

4) 庐山亚热带主要森林土壤有机碳密度低于全国和世界平均水平, 但依然是我国森林生态系统重要的土壤碳库。

5) 庐山森林土壤有机碳含量以及有机碳密度主要集中在表层, 表层凋落物是进入土壤有机碳的重要来源, 植被类型的不同是造成本区森林土壤有机碳空间分异的重要原因, 加强地表凋落物的科学管理, 对于保持和提高庐山森林土壤碳库的能力具有重要的意义。

基金项目

江苏师范大学博士学位教师科研支持项目(19XFRS013)。

参考文献

- [1] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 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.
- [2] 戴巍, 赵科理, 高智群, 等. 典型亚热带森林生态系统碳密度及储量空间变异特征[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 1-11.
- [3] Jobbágy, E.G. and Jackson, R.B. (2000) The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Applications*, **10**, 423-436.
[https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- [4] Chen, L.F., He, Z.B., Du, J., Yang, J.J. and Zhu, X. (2016) Patterns and Environmental Controls of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen in Alpine Ecosystems of Northwestern China. *Catena*, **137**, 37-43.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.017>
- [5] 李江. 中国主要森林群落林下土壤有机碳贮量格局及其影响因子的研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [6] 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.
- [7] 马少杰, 李正才, 周本智, 等. 北亚热带天然次生林群落演替对土壤有机碳的影响[J]. 林业科学研究, 2010, 23(6): 845-849.
- [8] 黄中秋, 傅伟军, 周国模, 等. 浙江省森林土壤有机碳密度空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 906-913.
- [9] 田耀武, 刘谊锋, 王聪, 等. 伏牛山森林土壤有机碳密度与环境因子的关联性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 83-90.
- [10] Yolasıgımaç, H.A. and Keleş, S. (2009) Changes in Carbon Storage and Oxygen Production in Forest Timber Biomass of Balci Forest Management Unit in Turkey between 1984 and 2006. *African Journal of Biotechnology*, **8**, 4872-4883.
- [11] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 1980-2010 年安徽省土壤有机碳密度及储量时空变化分析[J]. 地理研究, 2018, 37(11): 2206-2217.
- [12] 方运霆, 莫江明, Sandra Brown, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 135-142.
- [13] 叶玲燕. 浙江省森林土壤有机碳空间变异及影响因子研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [14] 田耀武, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区森林土壤有机碳空间分布模型的建立[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 11-16.
- [15] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 不同林地土壤有机碳储量及垂直分布特征[J]. 中国农学通报, 2010, 26(9): 132-135.
- [16] 弓文艳, 陈丽华, 郑学良. 基于不同林分类型下土壤碳氮储量垂直分布[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 152-157+164.
- [17] 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.
- [18] 于法展, 张忠启, 陈龙乾, 等. 庐山不同森林植被类型土壤碳库管理指数评价[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 470-475.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [20] 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.
- [21] 周纯亮. 中亚热带四种森林土壤有机碳库特征初步研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [22] 常宗强, 冯起, 司建华, 等. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 681-688.
- [23] 田大伦, 王新凯, 方晰, 等. 喀斯特地区不同植被恢复模式幼林生态系统碳储量及其空间分布[J]. 林业科学, 2011, 47(9): 7-14.
- [24] 官立, 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.

-
- [25] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687-699.
- [26] 王海燕, 雷相东, 张会儒, 等. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(3): 11-16.
- [27] 魏强. 亚热带典型森林凋落物输入对土壤有机碳累积和稳定性影响[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [28] 文伟, 彭友贵, 谭一凡, 等. 深圳市森林土壤主要类型有机碳分布特征[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(6): 106-113.
- [29] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 24-28.
- [30] 魏亚伟, 于大炮, 王清君, 等. 东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3333-3340.
- [31] 王春燕. 中国东部森林土壤有机碳组分的纬度格局及其影响因素[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [32] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [33] Dixon, R.K., Solomon, A.M., Brown, S., *et al.* (1994) Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, **263**, 185-190. <https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>