

DOI: 10.11766/trxb201909300184

吴小刚, 王文平, 李斌, 梁跃龙, 刘以珍. 中亚热带森林土壤有机碳的海拔梯度变化[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1539–1547.

WU Xiaogang, WANG Wenping, LI Bin, LIANG Yuelong, LIU Yizhen. Altitudinal Gradient of Soil Organic Carbon in Forest Soils in the Mid-Subtropical Zone of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1539–1547.

中亚热带森林土壤有机碳的海拔梯度变化*

吴小刚¹, 王文平², 李斌², 梁跃龙¹, 刘以珍^{2†}

(1. 江西九连山国家级自然保护区管理局, 江西赣州 341700; 2. 南昌大学生命科学学院, 南昌 330031)

摘要: 气候过渡区的山地森林土壤有机碳对气候波动的响应敏感, 探讨气候过渡区森林土壤有机碳的海拔格局, 是推演区域土壤碳库时空动态的关键内容。在南亚热带向中亚热带的气候过渡区江西九连山国家级自然保护区, 根据不同土壤类型的海拔分布格局, 沿海拔采集 20 个土壤剖面, 分析土壤有机碳含量和土壤碳密度的海拔分布格局。结果表明: (1) 不同土壤类型和深度均对土壤有机碳含量有影响, 山地草甸土有机碳含量更高, 达 $39.72 \pm 19.14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤有机碳主要集中在 0~40 cm, 深度分布表现出“表聚现象”; (2) 不同层次土壤有机碳含量对海拔的响应方式不一, 上层土壤对海拔梯度变化响应更敏感, 上层 0~40 cm 土壤有机碳随海拔升高而增加, 下层 40~100 cm 土壤有机碳含量随海拔升高而降低; (3) 土壤碳密度为 $10.64 \pm 0.72 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 但不同海拔的土壤碳密度无显著差异。海拔对土壤有机碳含量分布产生影响, 但随着土层深度增加, 海拔对土壤有机碳含量的影响变小; 而海拔对土壤有机碳密度格局无显著影响, 并依此估算九连山自然国家级自然保护区森林土壤有机碳储量为 $1.426 \pm 0.096 \text{ Pg}$ 。

关键词: 土壤有机碳; 土壤类型; 海拔梯度; 气候过渡区

中图分类号: S714.2 **文献标志码:** A

Altitudinal Gradient of Soil Organic Carbon in Forest Soils in the Mid-Subtropical Zone of China

WU Xiaogang¹, WANG Wenping², LI Bin², LIANG Yuelong¹, LIU Yizhen^{2†}

(1. Jiangxi Jiuliangshan National Nature Reserve Administration, Ganzhou, Jiangxi 341700, China; 2. College of Life Science in Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: 【Objective】 Forest soil organic carbon (SOC) is an important component of the carbon storage in the forest ecosystem. Accumulation and storage of SOC in the forest soil can directly affect carbon budgeting in the terrestrial ecosystem and global carbon recycling. SOC in mountain forest soils in the transitional climatic zone is sensitive to climatic change. So the subject of variation of SOC along an altitudinal gradient is also a key topic concerning regional carbon dynamics. Hence, the survey of altitudinal gradient of SOC in a transitional climate zone is far more valuable than that in a typical climate zone to predicting variation of regional SOC in response to climate changes. The objective of this study was to investigate effects of altitude on SOC so as to explain how carbon stocks distributes in the subtropical transitional climate zone of East China. 【Method】 A total of 20 soil profiles were prepared along the

* 林业国家级自然保护区专项补助资金资助 Support by the Forestry National Nature Reserve Special Fund

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuyizhen@ncu.edu.cn

作者简介: 吴小刚(1981—), 男, 江西赣州人, 林业工程师, 主要从事森林生态系统的科研与保护工作。E-mail: wuxiaogang123@tom.com

收稿日期: 2019-09-30; 收到修改稿日期: 2019-11-25; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-03-23

altitude (179-1 410 m a.s.l.) in Jiangxi Jiulianshan National Nature Reserve, located just in the transitional climate zone from the south-subtropical zone to the mid-subtropical zone. Soil samples were collected separately from five layers (0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm and 60-100 cm) of each of the soil profiles (0-100 cm). After being air-dried, the samples were analyzed for soil organic carbon content with the potassium bichromate oxidation titration method. Soil organic carbon density (SOCD) and soil organic carbon stocks (SOCS) were calculated. Along the altitude, red soil, red-yellow soil, yellow soil and meadow soil was distributed in sequence, so impacts of altitude on SOCC and SBD (soil bulk density) could be explored by analyzing the two parameters in the four types of soils. Soil layer depth and soil type were two factors affecting SOCC and SBD and their impacts were analyzed with two-way Analysis of Variance (two way- ANOVA); impact of soil type on SOCD was with ANOVA; and relationships of altitude with SOCC and SOCD were with Pearson correlation analysis and nonlinear analysis, respectively. 【Result】 Results show: (1) SBD increased dramatically with soil depth, but did not vary much between soil types; soil type and soil layer depth influenced SOCC, with the mountain meadow soil being the highest in SOCC among the four types and varying in the range of $39.72 \pm 19.14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; SOC accumulated mainly in the topsoil; SOCC in 0-10 cm was fourfold of that in 60-100 cm; and 84.74% of the SOC in the soil were accumulated in the 0-40 cm soil layer of the soil profile. (2) Topsoil was more sensitive than the other soil layers to change in altitude, and the effect of altitude on SOCC declined with soil depth; SOCC in the 0-40 cm topsoil increased with altitude, but in the 40-100 cm subsoil layer, SOCC acted reversely. (3) ANOVA shows that soil type did not contribute much to soil carbon density, so SOCD was estimated at $10.64 \pm 0.72 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and SOCS at $1.426 \pm 0.096 \text{ Pg}$ in the soil of the nature reserve. Pearson correlation analysis and nonlinear analysis shows that the relationship between altitude and SOCD could be expressed as $\text{SOCD}=1 \times 10^{-5} \text{ altitude}^2 - 0.0227 \text{ altitude} + 17.928$. 【Conclusion】 The findings in the study lead to the conclusion that the effects of altitude on SOC spatial distribution is quite complicated. Soil organic carbon accumulates mostly in the topsoil layer (0-40 cm) of the soil profiles. Topsoil SOCC increases with altitude, but the trend weakens with soil depth. However, altitude does not have any impact on SOCD.

Key words: Soil organic carbon; Soil type; Altitudinal gradient; Transitional climatic zone

土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库,是陆地植被碳库的 2~3 倍^[1]。森林土壤碳库约占全球陆地土壤碳库的 16%~26%^[2-3]。在气候变化背景下,气候过渡带极易受到气候波动的影响,气候过渡带的土壤碳库对气候变化的响应更为迅速和敏感^[4-5],如反应更敏锐的土壤呼吸、土壤矿化等碳循环过程,从而影响森林土壤碳存储和释放^[5-6]。然而,以往的土壤碳库研究更多是集中在典型气候带下的生态系统,主要探讨经营等措施、林龄等对土壤碳库的影响^[7-8],如孙金兵等^[9]探讨温带的长白山原始阔叶红松林和次生杨桦林森林土壤颗粒有机碳和黑碳的分布特征,少有关注气候过渡带下的土壤碳储量研究。但是了解气候过渡区森林土壤有机碳的分布,有助于正确评估森林生态系统碳循环,对于准确预测气候变化和制定应对气候变化的策略措施具有重要意义。

海拔是对区域尺度下水热条件的再分配,环境因子随海拔梯度的变化较纬度梯度快 1 000 倍。然而,目前的海拔梯度格局研究主要集中在植物群落、哺乳动物、鸟类、昆虫等动植物多样性的垂直分布。

而探讨土壤有机碳及碳储存的海拔格局较少^[10],从仅有的几个关于有机碳海拔分布的研究中可以看出,土壤有机碳有明显的海拔格局但表现不一。如马和平等^[11]对西藏色季拉山西坡表层土壤有机碳随着海拔的升高而增大,柯焯焯等^[12]研究粤北亚热带山地森林土壤有机碳的海拔格局也发现土壤有机碳沿海拔上升而升高的变化趋势,而徐华君等^[13]研究中天山北坡土壤有机碳密度发现中海拔区域土壤有机碳密度最大。因此,对于土壤有机碳含量及其储量的海拔分布格局依然不清楚。气候过渡区具有急剧变化的气候和生态梯度,气候过渡带的植物和土壤对气候变化的响应更为迅速和敏感^[5]。研究气候过渡区土壤碳库的海拔格局,可为土壤碳库动态的时空尺度推演指明方向,是估算中大尺度土壤碳库、预测碳库结构动态的关键内容。

江西九连山国家级自然保护区处于南亚热带向中亚热带的过渡区,其土壤有机碳及碳密度的海拔分布格局如何?是否有土壤层次分异?对这些问题的探讨,有助于了解我国中亚热带气候区森林土壤碳储量和碳密度分布格局,为亚热带森林生态系统固碳现

状评价、碳汇林业和可持续管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

南岭山脉是中国南部最大的山脉，是中亚热带和南亚热带的分界线^[14]。江西九连山国家级自然保护区（24°29'18"—24°38'55" N，114°22'50"—114°31'32" E）位于江西龙南县境内，处于南岭东段北坡，是我国建立较早的自然保护区，总面积为 13 411.6 hm²。保护区境内山峦起伏、地貌复杂，地势由南向北、从中山向低山丘陵过渡，主峰黄牛石海拔 1 430 m。该区气候属于典型的亚热带气候，温暖湿润，四季分明，年均气温 17.1℃，年均降雨量 1 816 mm^[15]。本区地带性土壤为红壤和黄壤，依

海拔由高至低，分别为山地草甸土、山地黄壤、山地红黄壤、山地红壤^[16]。在植物区系与植被区划上，处于我国中亚热带与南亚热带过渡区，生物多样性丰富、森林植被茂密且发育良好，主要有亚热带常绿阔叶林、针叶林、常绿落叶阔叶混交林、山地矮林、山顶草甸等。

1.2 样品采集与分析

2017 年 10 月，根据保护区的地势，依照海拔递降分别设置土壤样品点，共布置了 20 个采样点（如表 1）。在每个采样点挖取 1 个深度为 1 m 的土壤剖面，在剖面 0~10、10~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 采集土壤样品，带回实验室进行土壤碳含量分析。同时，在每个剖面的不同层次上，用 100 cm³ 环刀采集 1 个容重土样，采用烘干法测定土壤容重。

表 1 土壤采样点分布及其环境因子

Table 1 Soil sample sites and environmental factors

序号	小地名	海拔	经度	纬度	坡向	坡度	土壤类型	植被类型
NO.	Place	Altitude	Longitude	Latitude	Aspect	Slope/°	Soil type	Vegetation type
1	龙头滩	179	114.798°	24.980°	E	20	山地红壤	河滩灌丛
2	龙头滩	235	114.790°	24.977°	W	28	山地红壤	杉木林
3	丝茅坳	385	114.454°	24.589°	ES	10	山地红壤	次生林
4	张仙塘	488	114.430°	24.563°	WN	25	山地红壤	常绿阔叶林
5	青年点	490	114.419°	24.556°	W	5	山地红壤	次生林
6	中透瓶牛寨	505	114.416°	24.551°	WS	32	山地红壤	马尾松林
7	坪坑路口	575	114.451°	24.540°	ES	20	山地红壤	杉木林
8	黄牛石茶场	600	114.421°	24.512°	W	30	山地红黄壤	毛竹林
9	六号桥	650	114.468°	24.536°	W	26	山地红黄壤	杉木林
10	伏生路	693	114.467°	24.530°	WN	30	山地红黄壤	常绿阔叶林
11	白云寺	734	114.433°	24.514°	WS	28	山地红黄壤	苦竹林
12	上湖	800	114.490°	24.549°	ES	17	山地黄壤	杉木林
13	吃水沟	808	114.454°	24.530°	N	26	山地黄壤	落叶阔叶林
14	白云寺	830	114.436°	24.514°	W	28	山地黄壤	常绿阔叶林
15	白云寺	954	114.443°	24.509°	N	27	山地黄壤	常绿阔叶林
16	猴头杜鹃林	1 070	114.463°	24.513°	N	28	山地草甸土	山地矮林
17	黄牛石顶	1 170	114.462°	24.511°	EN	22	山地草甸土	山地矮林
18	黄牛石顶	1 270	114.462°	24.509°	EN	32	山地草甸土	山地矮林
19	黄牛石顶	1 360	114.462°	24.507°	EN	22	山地草甸土	山地矮林
20	黄牛石顶	1 410	114.462°	24.507°	N	24	山地草甸土	山顶草甸

土壤有机碳含量分析的样品,全部风干、碾碎,称量砂石和土壤样品质量,计算砂石含量。土壤样品全部经过 60 目土壤筛,然后采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定土壤有机碳含量^[17]。

1.3 数据处理

土壤有机碳密度 (Soil organic carbon density, SOCD), 采用如下公式计算:

$$SOCD = \sum (1 - \rho_i) \times D_i \times T_i \times C_i / 100$$

式中, SOCD 为土壤有机碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), ρ_i 为砂石的比例 (%), D_i 为第 i 层土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), T_i 为第 i 层土壤厚度 (cm), C_i 为第 i 层土壤有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

土壤有机碳储量 (Soil organic carbon stocks, SOCS), 采用如下公式计算:

$$SOCS = \sum SOCD_i \times A_i \times 10^{-6}$$

式中, SOCS 为土壤有机碳储量 (Pg), $SOCD_i$ 为第 i 个海拔段的平均土壤有机碳密度, A_i 为第 i 个海拔

段的面积 (km^2)。

不同类型土壤的容重及其有机碳含量及其深度分布格局的比较, 采用两因素方差分析 (two-way ANOVA) 和 Tukey 法进行事后多重比较分析。不同类型土壤有机碳密度比较采用单因素方差分析 (ANOVA), 土壤有机碳含量及有机碳密度的海拔分布格局采用 Pearson 相关分析。所有统计分析均使用 IBM SPSS Statistics 22.0 完成。

2 结果

2.1 不同类型土壤容重及有机碳含量

该保护区土壤容重为 $1.06 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($M \pm SE$, 下同)。不同类型土壤容重差异不显著 ($F=2.35$, $P=0.079$), 不同深度土壤容重差异显著 ($F=17.59$, $P<0.001$), 土壤类型与土壤深度对容重无交互影响 ($F=0.32$, $P=0.974$) (图 1)。随着土层加深, 土壤容重增加, 60~100 cm 的土壤容重最大, 而 0~10 cm 的土壤容重最小, 60~100 cm 土层容重是 0~10 cm 土层容重的 1.56 倍。

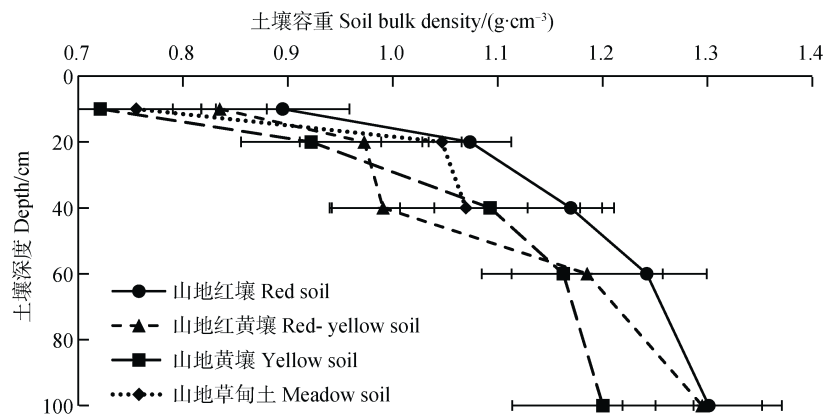


图 1 不同类型土壤容重及其深度变化

Fig. 1 Soil bulk density and its variation with soil depth relative to type of the soil

对土壤有机碳的两因素方差分析表明, 不同土壤类型 ($F=21.37$, $P<0.001$) 和土层深度 ($F=29.96$, $P<0.001$) 的土壤有机碳含量差异显著, 但是土壤类型和土层深度之间无交互作用 ($F=0.81$, $P=0.62$) (图 2)。在不同土壤类型中, 山地草甸土的有机碳含量最高, 其含量为 $39.72 \pm 19.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他三种土壤类型的有机碳含量无显著差异。从土层深度来看, 0~10 cm 的含量最高, 含量为 $38.28 \pm 18.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并且随着土层深度增加, 土壤有机碳含量逐渐降低, 其中 10~

20 cm 土层为 $20.01 \pm 10.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 20~40 cm 土层为 $12.72 \pm 9.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 40~60 cm 土层为 $8.30 \pm 8.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 60~100 cm 土层的有机碳含量最低, 其含量仅为 $4.49 \pm 2.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 仅占 0~10 cm 土层有机碳含量的 11.72%。并且各土壤类型均表现为土壤有机碳集中于上层 0~40 cm, 占全部土层有机碳含量的 84.74%, 而表现为“表聚现象”。而山地草甸土各土壤层次的有机碳含量均较其余三个土壤类型对应层次更高。

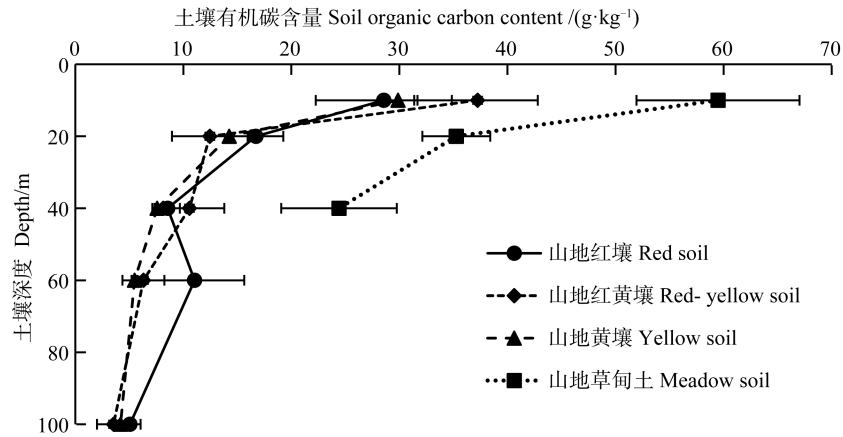


图 2 不同土壤类型的有机碳含量及其深度变化

Fig. 2 SOC content and its variation with soil depth relative to type of the soil

2.2 土壤有机碳含量与海拔的关系

从各土层深度来看，上层土壤有机碳含量与海拔呈显著正相关，如 0~10 cm 与海拔的相关系数为 0.716 ($P=0.001$)，10~20 cm 的相关系数为 0.568 ($P=0.009$)，20~40 cm 的相关系数为 0.529 ($P=0.016$)。下层 (40~60 cm 和 60~100 cm) 土壤

有机碳含量不受海拔梯度格局影响 (P 值分别为 0.235 和 0.061)。对各土层深度的土壤碳含量与海拔建立一元线性模型，各土层线性模型的斜率与土层深度呈显著负相关 ($r=-0.879$, $P=0.039$)，表明海拔对土壤有机碳含量的影响随土层深度增加而显著降低。

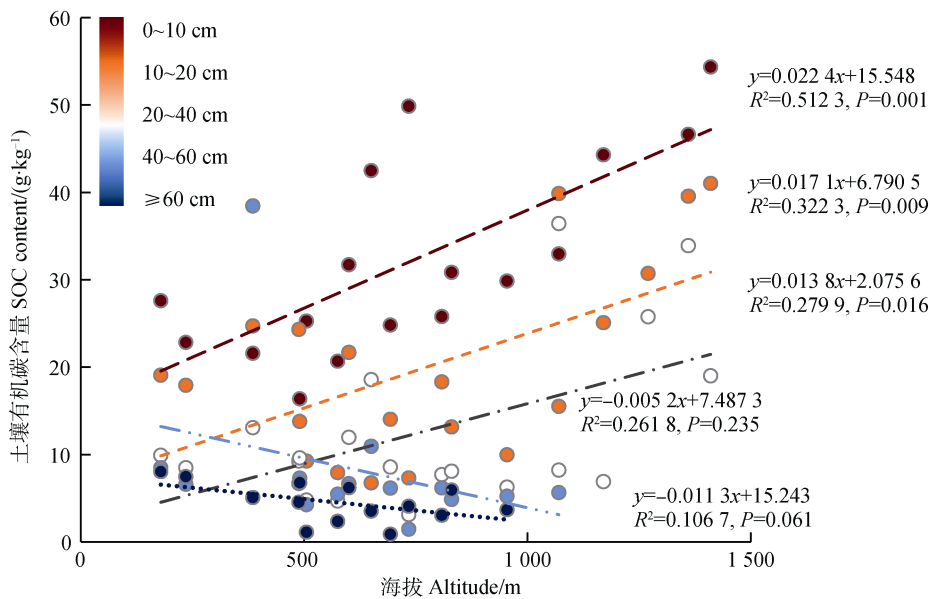


图 3 不同土层土壤有机碳含量的海拔梯度格局

Fig. 3 Altitudinal gradient of SOC content relative to soil layer

2.3 土壤碳密度的海拔梯度格局

分析不同类型和海拔的土壤有机碳密度，保护区土壤有机碳密度为 $10.64 \pm 0.72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。不同类型土壤间的 ANOVA 分析表明土壤类型间土壤有机碳密度没有显著差异 ($F=1.88$, $P=0.17$) (表 2)。海拔

与土壤有机碳密度进行 Pearson 相关分析表明海拔与土壤有机碳密度之间相关性不显著 ($r=0.07$, $P=0.78$) (图 4)，即中海拔区域土壤有机碳密度比低海拔和高海拔区土壤有机碳密度稍低，而呈现“V”字形格局。采用多项式拟合海拔 (x) 与土

表 2 不同土壤类型土壤有机碳密度

Table 2 Soil organic carbon density relative to type of the soil

土壤类型 Soil type	自由度 df	均值 Mean / (kg·m ⁻²)	标准误 SE	变异系数 CV/ %
山地红壤 Red soil	7	11.24	1.38	32.39
山地红黄壤 Red-yellow soil	4	9.31	1.19	25.53
山地黄壤 Yellow soil	4	8.37	1.04	24.95
山地草甸土 Meadow soil	5	12.66	1.31	23.09
总计 Total	20	10.64	0.72	30.07

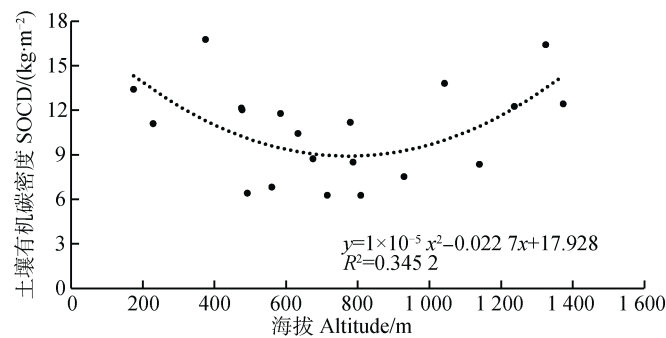


图 4 土壤有机碳密度的海拔梯度格局

Fig. 4 Altitudinal gradient of soil organic carbon density

壤有机碳密度(y)的关系表明: $y=1 \times 10^{-5} x^2 - 0.022 7x + 17.928$, $R^2=0.345$, 可估算九连山自然保护区的土壤有机碳储量为 $106.35 \pm 7.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3 讨论

3.1 土壤有机碳含量及其密度的分布特征

土壤有机碳的空间分布格局是土壤碳库估算的重要内容。不同土壤类型的成土过程不同, 以及生物地化过程的差别将导致土壤有机碳含量的差异。本研究结果显示, 分布海拔较高的山地草甸土的土壤有机碳含量明显高于低海拔的山地红壤、山地红黄壤及山地黄壤, 这与薛丽佳等^[18]对武夷山不同类型土壤有机碳含量分布的结果一致。而在山地森林土壤中, 不同土壤类型的形成主要是成土母质在不同海拔受不同水热条件和地表植被影响的结果。山地草甸土主要分布于中山山顶, 海拔较高, 气温较低, 植被凋落物分解缓慢, 形成较厚的腐殖质层, 成土年轻^[19-20], 因此土壤有机碳含量明显高于低海拔的土壤类型。然而, 由于山地草甸土风化作用较弱, 土层较薄, 土壤厚度常不足 1 m ^[16, 20], 因此该

类型土壤有机碳密度与基带土壤没有显著差异。

而从土壤碳密度来看, 不同土壤类型间没有显著差异, 土壤有机碳密度与海拔的相关性不显著, 表现为低海拔和高海拔的土壤有机碳密度稍高于中海拔。土壤碳密度主要取决于碳的输入输出的动态平衡, 以及土壤物理结构。土壤物理结构主要受成土母质、地形、水热条件的影响, 从而表现出不同土壤类型的物理结构差异。然而江西九连山国家级自然保护区的土壤容重在不同土壤类型间无显著差异, 因此土壤碳密度的海拔格局主要受土壤碳累积过程的影响。低海拔区域的主要为河岸带和河滩地, 这类区域的土壤有机碳主要来自于外源输入且分解慢^[21], 如上游和旁边高地随水流携带而来, 因此这类区域的土壤碳密度较高。高海拔地区气温低、昼夜温差大, 因此有机质分解慢^[22], 土壤有机碳密度也较高, 从而形成现有的土壤有机碳密度海拔梯度格局。

本研究估算江西九连山国家级自然保护区的土壤有机碳密度为 $106.35 \pm 7.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 接近王绍强等^[23]计算的我国东部土壤有机碳密度 $105.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而低于邸月宝等^[24]计算的江西九连山国家级自然保

保护区的土壤碳储量 $127.84 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。造成该数值不一致的原因可能有两个方面。一方面，邸月宝等高估了此地 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土壤有机质占 $0\sim 100 \text{ cm}$ 的比例，该研究参考了李昌华和李家永的经验值 50%，然而 Jobbágy 和 Jackson^[25]分析热带常绿阔叶林森林土壤垂直分布认为 20 cm 土壤有机碳占 $0\sim 100 \text{ cm}$ 的是 44%，李英升^[26]也通过江西 60 余个样地土壤剖面的有机碳测定表明上层 $0\sim 30 \text{ cm}$ 占 $0\sim 100 \text{ cm}$ 的 50%。我们测定的结果也表明，该比例在 40% 左右，不同土壤类型的数值不同，比如分布于 $1\ 000 \text{ m}$ 以上的山地草甸土的土层不到 40 cm ，表层 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土壤有机碳含量占剖面土壤有机碳含量的 65% 左右；分布于 1000 m 以下的其他类型土壤，表层 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土壤有机碳含量约占 $0\sim 100 \text{ cm}$ 的 40%，其中山地红壤为 38.67%，山地红黄壤为 43.30%，山地黄壤为 40.74%。另一方面，邸月宝等^[24]的研究样品仅包含了低海拔 $450\sim 712 \text{ m}$ 的部分山地红黄壤的土壤样品，土壤类型和海拔序列不完整也是产生结果偏差的主要原因。

3.2 土壤有机碳海拔格局及其成因

海拔是影响生态系统结构的重要因素，也是土壤有机碳空间分布格局的重要影响因子。通过上述研究表明，在不考虑土壤类型的情况下，江西九连山国家级自然保护区的土壤有机碳含量具有明显的海拔分布格局，即随着海拔的上升而增加的趋势。并且在上层 $0\sim 40 \text{ cm}$ 土壤有机碳含量随着海拔升高而增加，而 $40\sim 100 \text{ cm}$ 的土壤有机碳不受海拔分布影响，即随着土层深度增加土壤有机碳随海拔的变化率下降。这与 Tashi 等^[27]在喜马拉雅东坡 $317\sim 3\ 300 \text{ m}$ 的土壤剖面研究和全球土壤海拔格局的 meta 分析结果一致。但是土壤容重随海拔增加而降低，可能导致土壤碳密度与海拔的关系不显著。

土壤有机碳含量与海拔、温度、成土过程、植被类型等显著相关，而温度、植被类型等因素与海拔是强相关^[27]。上层土壤有机碳含量的影响因素更复杂，植被、微生物、凋落物、气候等均对上层土壤有机碳输入产生重要影响；而下层土壤有机碳动态主要受土壤类型驱动^[28]。在区域尺度，海拔是对温度和降水这两个重要气候因子的再分配，而温度和降水也是影响土壤有机碳分布格局的最主要的气候因子^[25]，通过影响植被分布和有机质分解，从而对土壤有机碳的积累或消耗产生影响，尤其年均温

(Mean annual air temperature, MAT) 对上层土壤有机碳的分解过程影响深远^[28]。此外，降水还与土壤有机碳垂直分布是正相关^[25, 28]。本研究由于缺乏九连山地区的海拔梯度的温度和降水数据，未能深入解析温度和降水对土壤有机碳分布格局的影响，而是通过与海拔的相关分析方法间接推导该影响的存在，并且对上层土壤的影响强于下层土壤。

4 结 论

土壤有机碳的海拔格局是土壤物质含量空间格局的重要组成。江西九连山国家级自然保护区土壤有机碳集中分布于上层 $0\sim 40 \text{ cm}$ 而表现为“表聚现象”，上层土壤 ($0\sim 40 \text{ cm}$) 较下层土壤 ($40\sim 100 \text{ cm}$) 对海拔变化的响应更强烈，并且对海拔变化的反应趋势不一，上层土壤有机碳含量为随海拔升高而升高，下层土壤为随海拔升高而降低。土壤碳密度对海拔梯度变化的响应表现与土壤有机碳含量不同。不同土壤类型的碳密度之间无显著差异，但土壤碳密度的海拔格局表现为中海拔低、两端高的特点。同时，估算江西九连山国家级自然保护区土壤碳密度为 $106.35 \pm 7.15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，进而可估算该保护区土壤有机碳储量为 $1.426 \pm 0.096 \text{ Pg}$ 。

参考文献 (References)

- [1] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales[J]. *Geoderma*, 2019, 333: 149—162.
- [2] Pan Y, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333 (6045): 988—993.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press.
- [4] Liu Y C, Shang Q, Wang L, et al. Responses of soil respiration to changing precipitation regimes in an oak forest at a climate transitional zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (24): 8054—8061. [刘彦春, 尚晴, 王磊, 等. 气候过渡带锐齿栎林土壤呼吸对降雨改变的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36 (24): 8054—8061.]
- [5] Wang L, Chen W, Huang G, et al. Changes of the transitional climate zone in East Asia: Past and future[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 49 (4): 1463—1477.
- [6] Zhang Z S, Li M, Song X L, et al. Effects of climate change on molecular structure and stability of soil carbon

- pool: A general review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (2): 273—282. [张仲胜, 李敏, 宋晓林, 等. 气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (2): 273—282.]
- [7] Fang H J, Geng J, Cheng S L, et al. Effects of nitrogen and phosphorus enrichment on carbon sequestration in forest soils: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (1): 1—11. [方华军, 耿静, 程淑兰, 等. 氮磷富集对森林土壤碳截存的影响研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (1): 1—11.]
- [8] Wu C J, Guo J F, Xu E L, et al. Effects of logging residue on composition of soil carbon and activity of related enzymes in soil of a young Chinese fir plantation as affected by residue handling mode[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (6): 1504—1513. [吴传敬, 郭剑芬, 许恩兰, 等. 采伐残余物不同处理方式对杉木幼林土壤有机碳组分和相关酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (6): 1504—1513.]
- [9] Sun J B, Gao F, Song J F, et al. Distributions of soil particulate organic carbon and black carbon of two forest types in Changbai Mountain[J]. *Forest Research*, 2017, 30 (2): 222—231. [孙金兵, 高菲, 宋金凤, 等. 长白山两种森林类型土壤颗粒有机碳和黑碳分布特征[J]. *林业科学研究*, 2017, 30 (2): 222—231.]
- [10] Wang S F, Wang X K, Ouyang Z Y. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in upstream watershed of Miyun reservoir in North China[J]. *Soils*, 2011, 43 (4): 515—524. [王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳特征及其影响因素[J]. *土壤*, 2011, 43 (4): 515—524.]
- [11] Ma H P, Guo Q Q, Liu H M, et al. Changes of soil organic carbon and total nitrogen at different altitudes in west slope of Sejila Mountain of Tibet[J]. *Forest Research*, 2013, 26 (2): 240—246. [马和平, 郭其强, 刘合满, 等. 西藏色季拉山西坡不同海拔梯度表层土壤碳氮变化特性的研究[J]. *林业科学研究*, 2013, 26 (2): 240—246.]
- [12] Ke X D, Zhang L, Su Z Y. Variation of soil organic carbon content along altitudinal gradient in subtropical montane forest in North Guangdong[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28 (2): 151—156. [柯娴娴, 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[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28 (2): 151—156.]
- [13] Xu H J, Wang W X, Wang D T. Distribution characteristics of soil organic carbon density on the northern slope in the middle section of Tianshan Mountainous[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22 (5): 35—38. [徐华君, 王文欣, 王丹彤. 中天山北坡垂直带土壤有机碳密度分布特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22 (5): 35—38.]
- [14] Compilation Committee for Physical Geography Records of Jiangxi. *Jiangxi Local Records. Vol 3: Physical Geography Records of Jiangxi*[M]. Beijing: Publishing House of Local Records, 2003. [《江西省自然地理志》编纂委员会. 江西省志. 3卷: 江西省自然地理志[M]. 北京: 方志出版社, 2003.]
- [15] Liu X Z, Xiao Z Y, Ma J H. Scientific survey and study on the forest ecosystem in Jinagxi Jiuliashan Nature Reserve[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002. [刘信中, 肖忠优, 马建华. 江西九连山自然保护区科学考察与森林生态系统研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.]
- [16] Liu K S, Sun W L, Wu W H. Pedogenesis and fertility characteristics on Mt Jiulian[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1983, 5 (1): 43—50. [刘开树, 孙文雷, 吴文辉. 九连山土壤的发生类型及其肥力性状的探讨[J]. *江西农业大学学报*, 1983, 5 (1): 43—50.]
- [17] Determination of organic matter in forest soil and calculation carbon-nitrogen ratio[S]. LY/T 1237-1999. Beijing: China Standards Press, 1999. [森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. LY/T1237-1999. 北京: 中国标准出版社, 1999.]
- [18] Xue L J, Gao R, Yang Y S, et al. Distribution pattern of organic carbon and black carbon from different soils in Wuyi Mountains[J]. *Forest Research*, 2011, 24 (3): 399—403. [薛丽佳, 高人, 杨玉盛, 等. 武夷山土壤有机碳和黑碳的分配规律研究[J]. *林业科学研究*, 2011, 24 (3): 399—403.]
- [19] Xiao S S, Chen W R, Xu Y P, et al. Altitude pattern and impact factor of mountain soil organic carbon on Mt Wuyi[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14 (11): 65—67, 91. [肖霜霜, 陈武荣, 许燕萍, 等. 武夷山山地土壤有机碳的垂直分布规律及影响因素研究[J]. *安徽农学通报*, 2008, 14 (11): 65—67, 91.]
- [20] Chen L N. Study on mountain meadow soil pedogenesis on Mt Wuyi[J]. *Journal of Liaoning Teachers College: Natural Science Edition*, 2005, 7 (3): 91—92. [陈丽娜. 武夷山山地草甸土成土因素分析[J]. *辽宁师专学报: 自然科学版*, 2005, 7 (3): 91—92.]
- [21] Sutfin N A, Wohl E E, Dwire K A. Banking carbon: A review of organic carbon storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian ecosystems[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41 (1): 38—60.
- [22] Zhu B, Wang X P, Fang J Y, et al. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China[J]. *Journal of Plant Research*, 2010, 123 (4): 439—452.
- [23] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, et al. Analysis on Spatial Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Reservoir in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 67 (5): 533—544. [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, 67 (5): 533—544.]

- [24] Di Y B, Wang H M, Ma Z Q, et al. Carbon storage and its allocation pattern of forest ecosystems with different restoration methods in subtropical China[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57 (17): 1553—1561. [鄢月宝, 王辉民, 马泽清, 等. 亚热带森林生态系统不同重建方式下碳储量及其分配格局[J]. 科学通报, 2012, 57 (17): 1553—1561.]
- [25] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, 10 (2): 423—436.
- [26] Li Y S. Study on soil organic carbon storage and carbon sequestration of main forest type in Jiangxi Province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41 (14): 154—158. [李英升. 江西省典型森林类型土壤碳储量及碳汇能力研究[J]. 广东农业科学, 2014, 41 (14): 154—158.]
- [27] Tashi S, Singh B, Keitel C, et al. Soil carbon and nitrogen stocks in forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and a meta-analysis of global data[J]. Global Change Biology, 2016, 22 (6): 2255—2268.
- [28] Schiedung M, Tregurtha C S, Beare M H, et al. Deep soil flipping increases carbon stocks of New Zealand grasslands[J]. Global Change Biology, 2019, 25 (7): 2296—2309.

(责任编辑：卢 萍)