应用生态学报 2021年7月 第32卷 第7期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Jul. 2021, 32(7): 2371-2377 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202107.007

中国成熟天然林土壤有机碳垂直分异特征

王深华[1,2] 江 军[1*] 刘丰彩[1,2] 俞梦笑[1] 陈 洋[1,2] 许萍萍[1,2] 常中兵[1,2] 王应平[1,3]
([1]中国科学院华南植物园，广州 510650; [2]中国科学院大学，北京 100049; [3]澳大利亚联邦科工组织，澳大利亚维多利亚 3195)

摘 要 以分布在中国不同气候区的131个成熟天然林土壤为研究对象，测定不同土层(0~10、10~20、20~30、30~50和50~100 cm)土壤有机碳(SOC)密度，分析其与气象因子、土壤性质的关系，研究天然林SOC垂直分布特征及其影响机理。结果表明：温带针叶林、温带落叶阔叶林、亚热带落叶阔叶林和亚热带常绿阔叶林0~30 cm土层SOC密度均随土壤深度增加而降低。在0~100 cm土层，SOC密度地带性分异明显，温带针叶林SOC密度显著高于温带落叶阔叶林，亚热带常绿阔叶林SOC密度显著高于亚热带落叶阔叶林。SOC密度与土壤黏粒、年降水量以及地上净初级生产力呈显著正相关，与土壤pH和年均温呈显著负相关。年降水量与年均温调节天然林SOC输入与输出，土壤pH与黏粒影响天然林SOC积累，对成熟的天然针叶林与常绿阔叶林进行有效保护，有利于增加我国森林土壤碳库。

关键词 土壤有机碳; 成熟天然林; 随机森林模型; 结构方程模型

Vertical differentiation of soil organic carbon in mature natural forests in China. WANG Shen-hua[1,2], JIANG Jun[1*], LIU Feng-cai[1,2], YU Meng-xiao[1], CHEN Yang[1,2], XU Ping-ping[1,2], CHANG Zhong-bing[1,2], WANG Ying-ping[1,3] ([1]*South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510650, *China*; [2]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; [3]*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Victoria* 3195, *Australia*).

Abstract: We analyzed the effects of meteorological factors and soil properties on vertical variation of SOC, based on soil organic carbon (SOC) density in different soil layers (0-10, 10-20, 20-30, 30-50, and 50-100 cm) from 131 mature natural forests in different climate zones in China. The results showed that SOC density decreased with increasing soil depth (0-30 cm) in temperate coniferous, temperate deciduous broadleaved, subtropical deciduous broadleaved and subtropical evergreen broadleaved forests. There were significant regional variations of SOC density in 0-100 cm soil layer. SOC density of 0-100 cm soil layer in temperate coniferous forests was higher than temperate deciduous broadleaved forests, and was higher in subtropical evergreen broadleaved forests than subtropical deciduous broadleaved forests. SOC density was significantly positively correlated with soil clay content, mean annual precipitation, and aboveground net primary production, and significantly negatively correlated with soil pH and mean annual temperature. Mean annual precipitation and mean annual temperature influenced input and output of SOC, while soil pH and clay content affected SOC accumulation. Therefore, protecting mature natural coniferous and evergreen broadleaved forests would benefit forest carbon sequestration in China.

Key words: soil organic carbon; mature natural forest; random forest model; structural equation model.

本文由国家自然科学基金项目(31901296)、**广东省基础与应用基础研究基金项目**(2021A1515010652)、**中国博士后基金项目**(2020M672863)**和中国科学院战略性先导科技专项**(XDA05050000)**资助** This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31901296), the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2021A1515010652), the China Postdoctoral Science Foundation (2020M672863), and the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA05050000).
2021-01-18 Received, 2021-03-24 Accepted.
* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: jiangjun@scib.ac.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

森林是陆地生态系统最大的有机碳库[1]，森林土壤有机碳(SOC)的变化将直接影响陆地生态系统碳平衡及其生态服务功能[2]。在国家造林政策的推进下，我国森林面积不断增加[3]，目前正以 4 $Tg \cdot a^{-1}$的速率持续积累 SOC[4]，在降低碳排放、应对全球变暖中发挥了重要作用。

近 20 年来，无论是从样点到样带，从区域到全球，还是从实测数据到遥感观测与模型模拟，对森林土壤 SOC 分布特征与影响因素进行了大量研究[5-6]，但这些研究更多是基于人工林生态系统[7]，难以排除人为干扰因素的影响，因而不能准确地揭示森林 SOC 的变化规律。与人工林相比，天然林长期受人类保护，人为扰动小，且多为处在演替顶极的成熟林，有着更高的生物多样性与更稳定的群落结构[8]。据第九次森林资源清查结果，我国天然林面积高达 13867.77×10^4 hm^{-2}，占全国森林总面积的 63.6%；天然林森林蓄积量为 136.71×10^8 m^3，占全部森林蓄积量的 80.1%[9]。这些天然林已经成为我国重要的碳汇林[10]，为我们更精确地评估森林 SOC 动态变化、垂直分布特征及其影响因素提供了理想场地。然而，过去关于天然林 SOC 的研究或局限于较小的时空尺度[11]，或仅利用相对粗糙的土壤普查数据[12]。天然林 SOC 的变化不仅取决于碳输入与碳输出之间的动态平衡，还会受到森林类型、土壤性质以及气候等多方面因素的影响[13]。目前，仍缺乏在大尺度范围内利用实测数据分析成熟天然林 SOC 垂直分布特征与影响因素的研究[14]。

为此，本研究以分布在中国不同气候区的 131 个成熟天然林为研究对象，通过大量实测数据分析天然林 SOC 的垂直分布特征及其与气候、森林类型和土壤性质的关系。本研究结果不仅能为模型评估森林土壤碳循环过程提供精确参数，也能为天然林的保护与可持续经营提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

成熟天然林样点分布在甘肃、广东、广西、贵州、黑龙江、湖南、江西、内蒙古、宁夏、青海、山西、陕西、四川、西藏和新疆 15 个省区(22°32′—52°25′ N，87°03′—130°44′ E)，涵盖的气候区包括热带、亚热带、温带、寒温带。年降水量 227.1～2044.2 mm，年均温 -9.3～21.6 ℃。森林类型包括寒温带针叶林($n=2$)、温带针叶林($n=42$)、温带落叶阔叶林($n=38$)、亚热带落叶阔叶林($n=15$)、亚热带常绿阔叶林($n=33$)及热带雨林($n=1$)。土壤类型包括风沙土、暗棕壤、草甸灰钙土、红壤、黄棕壤、灰色森林土以及棕色针叶林土[15]。

1.2 试验方法

根据中国森林的分布特征、物种组成与群落结构共建立 7800 个样地，每个样地建立 1 个 1000 m^2 的样方(20 m×50 m)(少数样方为 600 m^2)，每个样方包含 10 个 10 m ×10 m 子样方。在每个子样方内随机选取 5 个取样点，用内径为 5 cm 的土钻按照 0～10、10～20、20～30、30～50 和 50～100 cm 土层顺序分别采集土壤样品。每个样品经风干、过筛(2 mm)处理。SOC 含量用重铬酸钾氧化-外加热法测定，土壤容重用环刀法测定[15]。选取未受人类干扰的 131 个成熟天然林为研究对象，各样点分布情况见图 1。

1.3 数据来源与分析

采样点气候数据来自中国国家生态系统研究网(www.cnern.org.cn)。根据采样时所记录的经纬度用 ArcGIS 10.0 软件提取每一个样点的年均温和年降水量。土壤黏粒和 pH 来自 Wei 等[16]建立的全球土壤网格数据集(www.globalchange.bnu.edu.cn)，分辨率为 90 m，同样根据经纬度用 ArcGIS 10.0 软件提取相关数据。地上净初级生产力(aboveground net primary productivity，ANPP)来源于 MODIS (https://modis.gsfc.nasa.gov) 10 年平均值(2005—2014 年)。SOC 密度($t \cdot hm^{-2}$) = SOC 含量($g \cdot kg^{-1}$) ×容重($g \cdot cm^{-3}$) ×土壤深度(cm) /10。用 SPSS 22.0 软件进行统计分析，在分析之前对不符合正态分布的数据进行自然对数转换。用 t 检验分别

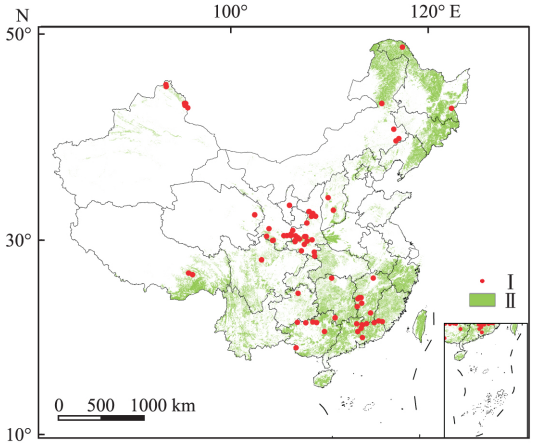

图 1 中国成熟天然林土壤取样点分布

Fig.1 Location of soil sampling sites in mature natural forests in China.

Ⅰ：采样点 Sampling point；Ⅱ：森林 Forest.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对温带和亚热带不同森林类型 SOC 密度进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)，寒温带和亚热带由于样本量小($n<10$)不作比较。用随机森林模型分析影响 SOC 的环境因子权重，随机选取 80%的样点作为训练集用于模型构建，剩下 20%的样点作为验证集。选取年均温、年降水量、土壤 pH、土壤黏粒和 ANPP 5 个环境因子用 R 中的 Randomforest 包进行模拟，其中参数 *ntree*(决策树数量)和 *mtry*(分裂次数)分别设为 200 和 3，模型预测后，将预测值与实际值进行线性拟合。用结构方程模型分析不同环境因子对 SOC 密度的直接和间接影响，用 Amos 21.0 软件构建结构方程模型，用最大似然法进行卡方检验，在逐步剔除不显著的路径后($P>0.10$)，得到最终的解释模型。

2　结果与分析

2.1　SOC 密度垂直分布特征

由图 2 可以看出，4 种类型森林 0~30 cm 各土层 SOC 密度均随土层深度增加而降低。其中，温带针叶林从 0~10 cm 的 37.55 t·hm^{-2}降至 20~30 cm 的 23.97 t·hm^{-2}；温带落叶阔叶林从 0~10 cm 的 33.16 t·hm^{-2}降至 20~30 cm 的 15.33 t·hm^{-2}；亚热带落叶阔叶林从 0~10 cm 的 21.08 t·hm^{-2}降至 20~30 cm 的 11.58 t·hm^{-2}；亚热带常绿阔叶林从 0~10 cm的 39.03 t·hm^{-2}降至 20~30 cm 的 20.85 t·hm^{-2}。所有森林 50~100 cm 土层 SOC 密度均高于其他土层。温带针叶林、温带落叶阔叶林、亚热带落叶阔叶林和亚热带常绿阔叶林整个土层(0~100 cm) SOC 密度分别为181.04、137.34、99.97 和 190.82 t·hm^{-2}。温带针叶林20~30、30~50 和 0~100 cm 土层 SOC 密度均显著高于温带落叶阔叶林；亚热带常绿阔叶林 0~100 cm 所有土层 SOC 密度均显著高于亚热带落叶阔叶林。

2.2　SOC 密度与环境因子的关系

随机森林模型表明(图 3)，0~50 cm 土层中，主要的解释因子是年均温和 ANPP，年均温对 SOC 的解释量为 12.5%~17.8%，ANPP 对 SOC 的解释量为 13.1%~17.9%。50~100 cm 土层中，最主要的解释因子为土壤黏粒，对 SOC 的解释量为 11.1%。随机森林模型的预测值与实际值进行线性拟合(图 4)显示，从表层到深层土壤 R^2依次为 0.63、0.48、0.32、0.36和 0.20，表明模型在表层土壤(0~10 cm)的预测性能较好，而在深层土壤(50~100 cm)的预测效果较差。

结构方程模型表明(图 5)，年均温对 0~100 cm 各土层SOC密度均有直接显著负效应($r=-0.801$~

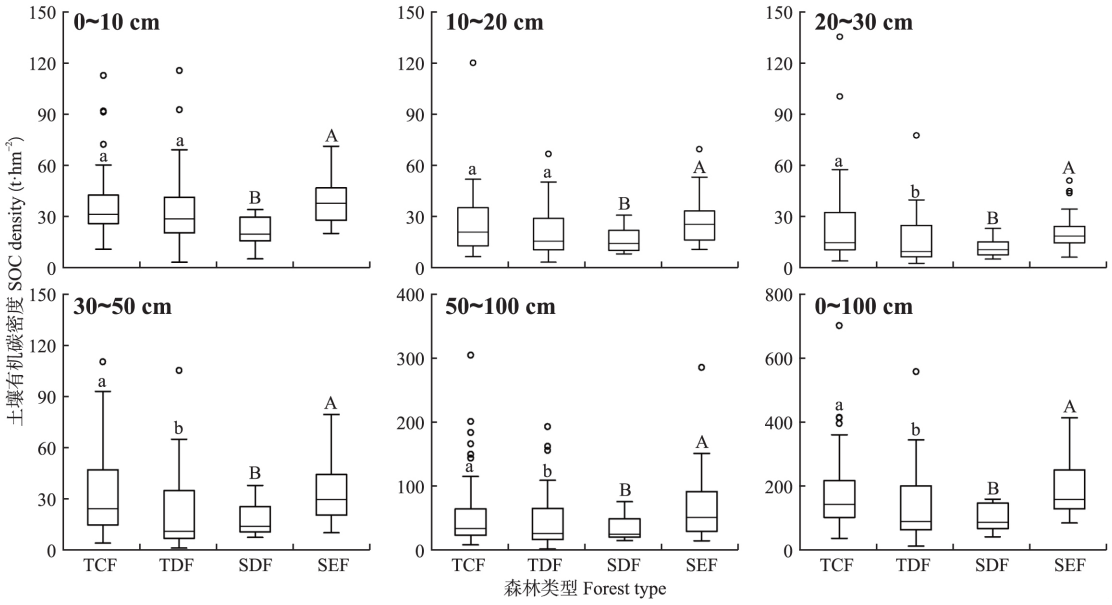

图 2　不同类型森林土壤有机碳密度

Fig.2　Soil organic carbon (SOC) density of different types of forests.

TCF：温带针叶林 Temperate coniferous forest；TDF：温带落叶阔叶林 Temperate deciduous broadleaved forest；SDF：亚热带落叶阔叶林 Subtropical deciduous broadleaved forest；SEF：亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broadleaved forest. 不同小写字母表示温带同一土层不同森林类型间差异显著，不同大写字母表示亚热带同一土层不同森林类型间差异显著($P<0.05$) Different lowercase letters indicated significant difference among different temperate forest types in the same soil layer, and different capital letters indicated significant difference among different subtropical forest types in the same soil layer at 0.05 level.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

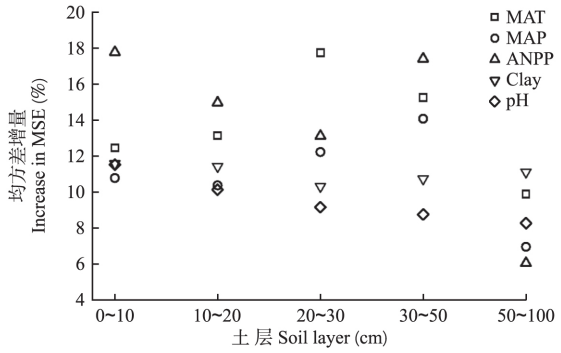

图 3 不同土壤深度环境变量的相对重要性

Fig.3 Relative importance of environmental variables at different soil depths.

MAP: 年均降水量 Mean annual precipitation; MAT: 年均温 Mean annual temperature; ANPP: 地上净初级生产力 Aboveground net primary productivity; Clay: 土壤黏粒含量 Soil clay content. 下同 The same below.

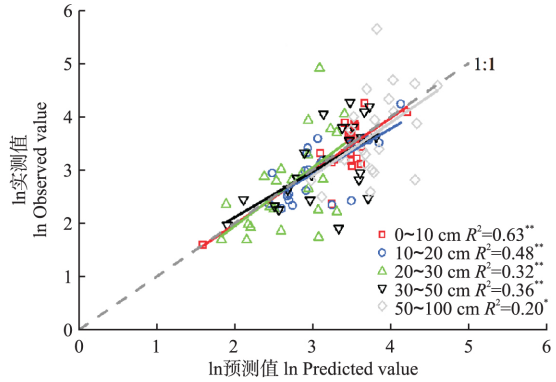

图 4 土壤有机碳(SOC)密度实测值与预测值的比较

Fig.4 Comparison of soil organic carbon (SOC) density between observed and predicted values.

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. 下同 The same below.

-0.462)；年降水量对 0~50 cm 各土层 SOC 密度有直接显著的正效应(r = 0.315~0.435)；ANPP 对 0~10 cm 和 10~20 cm 土层 SOC 密度有直接显著的正效应(r = 0.275~0.377)；土壤黏粒对 20~100 cm 各土层 SOC 密度有直接显著的正效应(r = 0.211~0.315)；土壤 pH 对 0~50 cm 各土层 SOC 密度有直接显著的负效应(r = -0.264~-0.232)。在 0~20 cm 各土层，年均温通过影响 ANPP 对 SOC 密度产生间接显著的负效应(r = -0.311)；土壤黏粒(r = 0.208~0.216)和年降水量(r = 0.765)通过影响 ANPP 对 SOC 密度产生间接显著的正效应。0~50 cm 各土层，由于土壤 pH 对 SOC 密度有直接显著的负效应(r = -0.264~-0.232)，而年均温对土壤 pH 有直接显著的正效应(r = 0.455~0.573)，因此年均温通过增加土壤 pH 对 SOC 密度产生间接显著的负效应；同样，由于年降水量对土壤 pH 有直接显著的负效应(r = -0.654~0.747)，年降水量通过降低土壤 pH 而对 SOC 密度产生间接显著的正效应。20~100 cm 各土层，年降水量通过影响土壤黏粒对 SOC 密度产生间接显著的正效应(r = 0.365~0.699)。

总体上，结构方程模型分别解释了各土层 SOC 密度变化的 35%(0~10 cm)、34%(10~20 cm)、42%(20~30 cm)、36%(30~50 cm)和 23%(50~100 cm)。各土壤深度 SOC 密度垂直分布的影响因子不同，年均温的影响贯穿整个 0~100 cm 土层，年降水量和土壤 pH 的影响主要体现在 0~50 cm 土层，土壤黏粒的影响主要体现在 20~100 cm 土层，而 ANPP 的影响仅体现在 0~20 cm 土层。

3 讨 论

3.1 天然林 SOC 分布特征

森林 SOC 在垂直分布上具有“表聚性”现象[13]。本研究中，当土层深度从 0~10 cm 增加到 20~30 cm 时，温带针叶林、温带落叶阔叶林、亚热带落叶阔叶林和亚热带常绿阔叶林 SOC 密度分别减少了 36.2%、53.8%、45.1%和 46.6%。与本研究结果相似，Jobbágy 等[13]发现，温带针叶林、温带常绿林、热带落叶林和热带常绿林 0~20 cm 土层 SOC 储量在 0~100 cm 土层的占比分别为 52%、47%、33%和 40%。苗娟等[17]发现，在 0~100 cm 土层中，19、28 和 45 年生云南松林 SOC 密度分别为 96.24、121.65和 148.13 t·hm^{-2}，且均随土层加深而降低。魏亚伟等[18]研究也表明，大兴安岭、小兴安岭和长白山森林 0~20 cm 土层 SOC 密度分别占整个土层的 85.4%、55.8%和 52.3%。此外，森林 SOC 分布具有明显的地区分异性。我国森林 SOC 密度最大的地区在大兴安岭山脉北部、祁连山脉、天山和阿尔泰山等地，最小的在新疆盆地、河西走廊及黄土高原部分地区[15]。在全球森林生态系统中，北方雨林土壤碳密度最高(256 t·hm^{-2})，亚热带干旱森林土壤碳密度最低(26 t·hm^{-2})[2]。

3.2 气候条件和森林类型对天然林 SOC 的影响

本研究中，SOC 密度与年均温在 0~100 cm 各土层呈显著负相关，与年降水量在 0~50 cm 各土层呈显著正相关，表明年降水量与年均温调节 SOC 的输入与输出[13]。一方面，温度增加导致土壤呼吸增加[19]，加速了 SOC 以 CO_2形式的输出，因而不利于森林 SOC 的积累；另一方面，降水增加了枯枝落叶层可溶性有机碳向土壤的淋溶，增加了森林 SOC 储量[20]。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

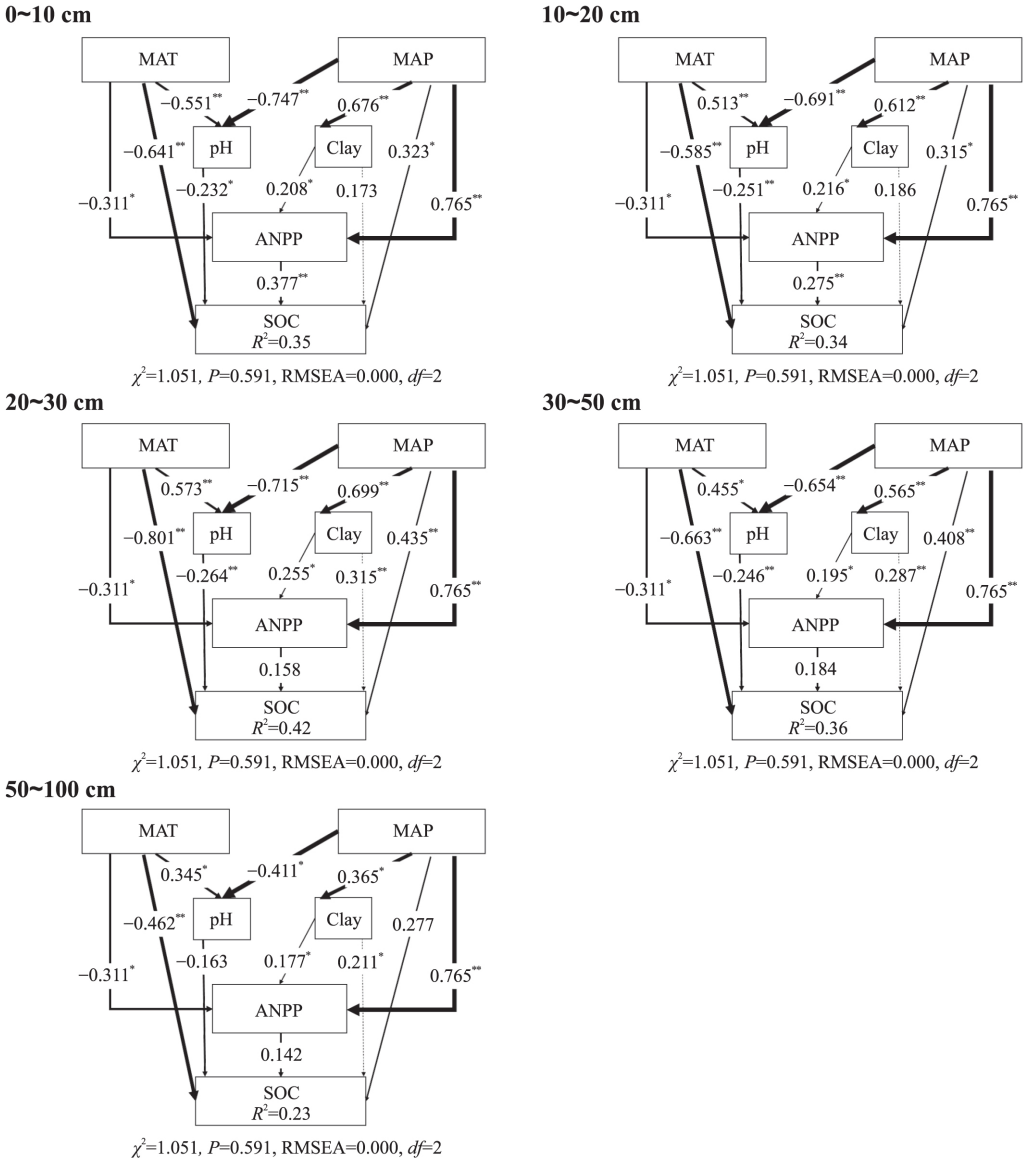

图 5　气候、土壤性质和地上净初级生产力(ANPP)对不同土层土壤有机碳(SOC)密度的作用路径

Fig.5　Impact paths of climate, soil property and aboveground net primary productivity (ANPP) on soil organic carbon (SOC) density in different soil layers.

本研究表明,在 0~100 cm 土层,温带针叶林 SOC 密度显著高于温带落叶阔叶林,这与王淑彬等[21]的研究结果一致。其原因可能与土壤有机质的分解速率[22]和森林生长速率不同有关。阔叶林生长地区通常水热条件良好,土壤呼吸速率更大,有机质分解更快,导致 SOC 积累的降低[23]。针叶林一般分布在纬度较高、气温较低、水热条件相对较差的地区,微生物的生命活动受限,有机质分解较慢,导致 SOC 积累的增加。同时,针叶林还会分泌更多的有机酸物质,从而抑制了微生物对 SOC 的分解[24]。另外,不同森林凋落物数量与质量的不同,也会导致 SOC 垂直分布的不同[13]。一般而言,常绿阔叶林凋落物数量要大于落叶阔叶林[25],因而常绿阔叶林 SOC 储量更大,这与本研究结果一致。但是,相比于阔叶林凋落物,针叶林凋落物拥有更高的 C∶N 和 C∶P,因而针叶林 SOC 难分解组分的占比更高,化学稳定性更强[26],更有利于 SOC 积累。

3.3　土壤性质对天然林 SOC 的影响

本研究中,SOC 密度与土壤 pH 在 0~50 cm 各土层呈显著负相关,表明土壤 pH 是影响森林 SOC 垂直分布的重要因素。表层与次表层土壤较低的 pH 不仅抑制了微生物对 SOC 的分解,延长了 SOC 的驻留时间,还能最大限度降低微生物残体碳的周转,从而促进 SOC 积累[27]。但是,在更深层土壤

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(特别是 50 cm 以下土壤),土壤 pH 对微生物的调控作用会变得极其微弱。因为在深层土壤中,一方面土壤 pH 较高,对微生物的抑制作用减弱;另一方面氧气与水热条件较差,微生物活性本身就很低,土壤 pH 对微生物的影响较小[13],因而深层土壤 pH 与 SOC 之间的相关性较弱。

有研究表明,SOC 的周转速率与土壤黏粒呈负相关关系,土壤黏粒含量越高,SOC 分解越慢[28]。本研究中,SOC 密度与土壤黏粒呈显著正相关(20~100 cm 土层),表明土壤黏粒是维持 SOC 稳定性的重要因素。土壤黏粒不仅通过减少 SOC 与微生物的接触而降低 SOC 分解,还通过对 SOC 的吸附而降低其淋失[13]。Sun 等[29]通过分析全球已发表的 289 个土壤剖面数据,发现土壤黏粒还可能通过调节土壤微生物生长所需的底物和营养物浓度来调控微生物生物量碳(MBC)的垂直分布,进而影响 SOC 的垂直分布。该研究还进一步发现,SOC 与 MBC 均随土壤深度的增加而呈指数下降,说明在区域尺度,甚至全球尺度上,土壤黏粒是 SOC 库的重要影响因子。本研究中,结构方程模型表明,土壤黏粒对 SOC 的影响在深层土壤(20~100 cm)更大,随机森林模型的结果也证明了这一点,这与 Jobbágy 等[13]的研究结论一致。

参考文献

[1] Pan YD, Birdsey RA, Fang JY, *et al*. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, **333**: 988-993

[2] Post WM, Emanuel WR, Zinket PJ, *et al*. Soil carbon pools and world life zones. *Soil Carbion Pools and World Life Zones*, 1982, **298**: 156-159

[3] Fang JY, Guo ZD, Piao SL, *et al*. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000. *Science China Earth Sciences*, 2007, **50**: 1341-1350

[4] Piao SL, Fang JY, Ciais P, *et al*. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, **458**: 1009-1014

[5] Chen SP, Wang WT, Xu WT, *et al*. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**: 4027-4032

[6] Huang YY, Lu XJ, Shi Z, *et al*. Matrix approach to land carbon cycle modeling: A case study with the community land model. *Global Change Biology*, 2018, **24**: 1394-1404

[7] Fernandez I, Cabaneiro A, Carballas T. Carbon mineralization dynamics in soils after wildfires in two Galician forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 1853-1865

[8] 刘世荣,马姜明,缪宁. 中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术. 生态学报, 2015, **35**(1): 212-218 [Liu S-R, Ma J-M, Miao N. Achievements in natural forest protection, ecological restoration, and sustainable management in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(1): 212-218]

[9] 崔海鸥,刘珉. 我国第九次森林资源清查中的资源动态研究. 西部林业科学, 2020, **49**(5): 90-95 [Cui H-O, Liu M. Analysis on the results of the 9th national forest inventory. *Journal of West China Forestry Science*, 2020, **49**(5): 90-95]

[10] Zhou GY, Liu SG, Li ZA, *et al*. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 2006, **314**: 1417

[11] 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的比较. 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. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, **38**(3): 494-499]

[12] 文雅,黄宁生,匡耀求. 广东省山区土壤有机碳密度特征及空间格局. 应用基础与工程科学学报, 2010, **18**(suppl.1): 10-18 [Wen Y, Huang N-S, Kuang Y-Q. Pattern and characteristics of soil organic carbon density in mountain area of Guangdong Province, China. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, **18**(suppl.1): 10-18]

[13] Jobbagy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, **10**: 423-436

[14] O'rourke SM, Angers DA, Holden NM, *et al*. Soil organic carbon across scales. *Global Change Biology*, 2015, **21**: 3561-3574

[15] Tang XL, Zhao X, Bai YF, *et al*. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**: 4021-4026

[16] Wei SG, Dai YJ, Liu BY, *et al*. A China data set of soil properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, **5**: 212-224

[17] 苗娟,周传艳,李世杰,等. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 625-631 [Miao J, Zhou C-Y, Li S-J, *et al*. Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Pinus yunnanensis* forests at different age stages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(3): 625-631]

[18] 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. 应用生态学报, 2013, **24**(12): 3333-3340 [Wei Y-W, Yu D-P, Wang Q-J, *et al*. Soil organic carbon density and its influencing factors of major forest types in the forest region of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(12): 3333-3340]

[19] 潘新丽,林波,刘庆. 模拟增温对川西亚高山人工林土壤有机碳含量和土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2008, **19**(8): 1637-1643 [Pan X-L, Lin B, Liu Q.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Effects of elevated temperature on soil organic carbon and soil respiration under subalpine coniferous forest in western Sichuan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(8): 1637-1643]

[20] **王晓峰，汪思龙，张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物生物量碳的影响. 应用生态学报**, 2002, **13**(6): 2393-2398 [Wang X-F, Wang S-L, Zhang W-D. Effects of Chinese fir litter on soil organic carbon decomposition and microbial biomass carbon. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(9): 2393-2398]

[21] **王淑彬，徐慧芳，宋同清，等. 广西森林土壤主要养分的空间异质性. 生态学报**, 2014, **34**(18): 5292-5299 [Wang S-B, Xu H-F, Song T-Q, *et al*. Spatial heterogeneity of the main nutrients in Guangxi forest soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(18): 5292-5299]

[22] Vancampenhout K, Wouters K, Vos BD, *et al*. Differences in chemical composition of soil organic matter in natural ecosystems from different climatic regions: A pyrolysis-GC/MS study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 568-579

[23] **梁宏温，温远光，温琳华，等. 连栽对尾巨桉短周期人工林碳贮量的影响. 生态学报**, 2009, **29**(8): 4242-4250 [Liang H-W, Wen Y-G, Wen L-H, *et al*. Effects of continuous cropping on the carbon storage of *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis* short-rotations plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(8): 4242-4250]

[24] Oostra S, Hooshang M, Olsson M. Impact of tree species on soil carbon stocks and soil acidity in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2006, **21**: 364-371

[25] **申广荣，项巧巧，陈冬梅，等. 中国森林凋落量时空分布特征. 应用生态学报**, 2017, **28**(8): 2452-2460 [Shen G-R, Xiang Q-Q, Chen D-M, *et al*. Spatio-temporal distribution characteristics of forest litterfall in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(8): 2452-2460]

[26] Wang H, Liu SR, Wang JX, *et al*. Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of indigenous tree species in subtropical China. *Ecological Research*, 2010, **25**: 1071-1079

[27] Fierer N, Jackson RB. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**: 626-631

[28] **黄耀，刘世梁，沈其荣，等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响. 应用生态学报**, 2002, **13**(6): 709-714 [Huang Y, Liu S-L, Shen Q-R, *et al*. Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(6): 709-714]

[29] Sun TT, Wang YG, Hui DF, *et al*. Soil properties rather than climate and ecosystem type control the vertical variations of soil organic carbon, microbial carbon, and microbial quotient. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **148**: 107905

作者简介　王深华，男，1991 年生，硕士研究生。主要从事森林生态系统养分循环研究。E-mail: 173145038@qq.com

责任编辑　孙　菊

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

王深华，江军，刘丰彩，等. 中国成熟天然林土壤有机碳垂直分异特征. 应用生态学报, 2021, **32**(7): 2371-2377
Wang S-H, Jiang J, Liu F-C, *et al*. Vertical differentiation of soil organic carbon in mature natural forests in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(7): 2371-2377