#### DOI: 10.20103/j.stxb.202411162812

梁誉正,陶贞,吴迪,钟庆祥,贺一聪,高全洲,林培松,张豫.凋落物性质和土壤理化过程调控山地森林土壤有机碳的稳定.生态学报,2025,45 (15): - .

Liang Y Z, Tao Z, Wu D, Zhong Q X, He Y C, Gao Q Z, Lin P S, Zhang Y.The litter traits and soil physicochemical processes regulate the stability of mountain forest soil organic carbon. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(15): - .

## 凋落物性质和土壤理化过程调控山地森林土壤有机碳 的稳定

梁誉正<sup>1</sup>,陶 贞<sup>1,\*</sup>,吴 迪<sup>1</sup>,钟庆祥<sup>1</sup>,贺一聪<sup>1</sup>,高全洲<sup>1</sup>,林培松<sup>2</sup>,张 豫<sup>2</sup> 1中山大学地理科学与规划学院,粤北岩溶区森林生态系统碳水耦合野外观测研究站,广州 510006 2嘉应学院地理科学与旅游学院,梅州 514015

摘要:土壤有机碳(Soil Organic Carbon,SOC)的稳定对于降低大气 CO<sub>2</sub>浓度和减缓气候变化至关重要。目前关于 SOC 稳定和积 累机制研究仍存在不确定性。选择位于我国南海之滨的莲花山北段气候、母质相似的不同植物群落表层(0—10 cm)土壤作为 研究对象,运用化学计量学、<sup>13</sup>C 稳定同位素技术和 Mantel test 相关性分析,探讨湿热季风区山地森林生态系统生物过程、物 理一化学过程对 SOC 稳定的作用。研究发现,(1)研究区表层 SOC 比较稳定,其中稳定的微团聚体有机碳和矿物结合态有机碳 占 SOC 含量的比例高达 65.68%;SOC 累积效率较高(平均为 0.79);颗粒态有机碳是 SOC 的主要组成组分(占 SOC 的 80.74%)。 (2)研究区表层土壤颗粒态有机碳的稳定取决于难降解的低质量凋落物的输入和较高比例(59.37%)的稳定微团聚体有机碳的 组成。(3) SOC 与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>显著正相关(*P*<0.01),揭示土壤铁、铝氧化物形成的有机—无机矿物复合物的物理化学保护也 是研究区 SOC 稳定的机制之一。随着土壤矿物化学风化过程的持续进行,研究区表层土壤仍具有持续积累和稳定 SOC 的潜 力。本研究可为湿热地区土壤碳汇机制研究和我国实现"碳中和"目标提供基础数据。

关键词:土壤有机质;颗粒态有机碳;微团聚体有机碳;累积效率;凋落物质量

# The litter traits and soil physicochemical processes regulate the stability of mountain forest soil organic carbon

LIANG Yuzheng<sup>1</sup>, TAO Zhen<sup>1,\*</sup>, WU Di<sup>1</sup>, ZHONG Qingxiang<sup>1</sup>, HE Yicong<sup>1</sup>, GAO Quanzhou<sup>1</sup>, Lin Peisong<sup>2</sup>, Zhang Yu<sup>2</sup>

1 Carbon-Water Research Station in Karst Regions of Northern Guangdong / School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

2 School of Geography and Tourism, Jiaying University, Meizhou 514015, China

Abstract: Stabilization of soil organic carbon (SOC) is critical in reducing atmospheric  $CO_2$  concentrations and mitigating climate change. However, the mechanisms of SOC stabilization and accumulation still remain uncertain. Here, the topsoil (0-10 cm) of different plant communities with similar climate condition and same parent material in the northern section of Lianhua mountain in the coast of the South China Sea was selected, Chemometrics, <sup>13</sup>C isotopic composition and Mantel test correlation analysis was employed for investigating the effects of biological processes and physico-chemical processes on SOC stability of mountain forest ecosystem in wet and hot monsoon area. The results showed that the topsoil SOC in the study area was relatively stable because the proportion of stable micro-aggregate organic carbon and mineral-associated organic

基金项目:国家自然科学基金(42471001,41771216)

收稿日期:2024-11-16; 网络出版日期:2025-00-00

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: taozhen@ mail.sysu.edu.cn

carbon was up to 65.68% in SOC content, and SOC accumulative efficiency was higher (average 0.79). The topsoil SOC pools were predominated by relatively stable functional components of particulate organic carbon (80.74% of SOC). The stability of the topsoil particulate organic carbon was determined by the input of the low quality litters and the high proportion (59.37%) components of the stable micro-aggregate organic carbon. The SOC was significantly positively correlated with  $Fe_2O_3$  and  $Al_2O_3(P < 0.01)$ , respectively, implying the physico-chemical protection of organic-inorganic mineral complexes formed with Fe oxides and Al oxides was one of the stable mechanisms of SOC in the study area. The soil had still the potential to stabilize and accumulate SOC persistently with proceeding the soil minerals chemical weathering process. It is recommended that the necessity in the future studies for measuring the organic carbon and mineral-associated organic carbon content of riverine suspended material in the "slop-river" system in the rainy season, especially during heavy rainfall, to accurately evaluate the SOC sequestration change of forest in hot and humid areas in China. These results can provide basic data for the study of soil C sink mechanism in hot and humid areas and the realization of carbon neutrality in China.

Key Words: Soil organic matter; particulate organic carbon; micro-aggregates carbon; accumulation efficiency; litter quality

陆地生态系统中土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)的持续驻留是降低大气 CO<sub>2</sub>浓度的有效策略之 一<sup>[1]</sup>,而且 SOC 的稳定能够改善土壤健康和提供土壤服务<sup>[2]</sup>。因此,SOC 积累及其稳定性研究逐渐成为国内 外研究的热点<sup>[3-7]</sup>。SOC 是一个复杂的有机连续体,由分解程度不同的植物化合物(植物源碳)和微生物同 化合成的化合物(微生物源碳)组成<sup>[8]</sup>。SOC 的形成和稳定受制于凋落物性质、微生物活性和土壤基质之间 的耦合作用<sup>[9]</sup>。凋落物质量差异制约微生物的分解速率和 SOC 的组成<sup>[10-11]</sup>,例如较高质量(C:N 较低,结构 性碳含量低)的凋落物主要通过体内途径形成微生物脂质;低质量(C:N 较高,富含难降解木质素、脂类、纤维 素和单宁等)凋落物通过限制微生物胞外酶对细胞壁多糖的可及性限制凋落物的分解,并通过微生物体外修 饰形成颗粒态有机质<sup>[12-13]</sup>。土壤中活体微生物生物量小(仅占土壤有机质的 1%—3%)且周转速率较快;微 生物同化转化植物碳为稳定的微生物残体碳(包括微生物死亡残体和部分代谢产物)是活体生物量的 40 倍<sup>[14]</sup>,且其分解缓慢或者受矿物保护而成为稳定 SOC 库的重要贡献者<sup>[15-17]</sup>。矿物保护即土壤矿物通过吸 附、封闭、聚集、氧化还原反应和聚合等生物—理化过程,将植物源或微生物源的不稳定有机碳转化为稳定的 SOC,从而促进 SOC 的稳定和积累<sup>[18-19]</sup>。

根据粒径大小,土壤有机质(Soil Organic Matter,SOM)分为颗粒态有机质(Particulate Organic Matter, POM)、矿物结合态有机质(Mineral-Associated Organic Matter,MAOM)和溶解态有机质(Dissolved Organic Matter,DOM)。由于溶解态有机碳含量仅占SOC的1—2%<sup>[19–21]</sup>,常被忽略不计。颗粒态有机碳(Particulate Organic Carbon,POC)库主要由大分子动植物残体组成,具有较快的周转速率;矿物结合态有机碳(Mineral-Associated Organic Carbon,MAOC)库以微生物残体碳为主,具有较慢的周转速率从而成为SOM中最稳定的组 分<sup>[19]</sup>。显然,POC和MAOC的变化影响着SOC的稳定性,尤其MAOC的形成—积累机制可促使大气CO<sub>2</sub>长 期固存于土壤中<sup>[7,9]</sup>。黏土含量作为MAOC形成的重要决定性因素已得到广泛关注<sup>[22]</sup>。近年来,稳定碳同 位素组成( $\delta^{13}$ C)被广泛应用于示踪SOC的微生物分解速率和SOC的稳定性研究<sup>[13]</sup>。植物凋落物和根系分 泌物是SOM的主要来源,但是受土壤微生物分解过程的分馏效应影响,SOM的 $\delta^{13}$ C值偏大<sup>[23]</sup>。对比分析植 物凋落物与土壤 $\delta^{13}$ C值的差异可识别生态系统碳元素流动的方向和强度<sup>[24]</sup>。

由于地球表层植物群落的异质性和土壤系统的多相复杂性,使得 POC 和 MAOC 对 SOC 的定量贡献及其 影响因素仍存在不确定性。例如,随着气候变暖,青藏高原高寒草地土壤微生物优先分解植物源底物形成微 生物残体 C,最终导致土壤 MAOC 占 SOC 的比例增加<sup>[25]</sup>。温带落叶针叶—阔叶混交林土壤 MAOC 含量随矿 物风化程度增加而增加进而有效提高 SOC 的稳定性<sup>[7]</sup>。对巴西人工桉树林铁铝土 SOC 组分变化研究表明, 地上凋落物可促进 POC 和 MAOC 的增加;根系凋落物导致 POC 的净增加<sup>[13]</sup>。土地利用方式改变和植物群 落的树种多样性亦促使 SOC、POC 和 MAOC 含量的变化。热带季风区不同人工林(橡胶、香蕉和槟榔)土壤黏 土矿物含量通过调控土壤微生物群落结构及其残体碳的积累进而影响 SOC 的储量<sup>[26]</sup>;具有树种多样性的天 然次生林可增大森林 SOC 的储存<sup>[27]</sup>。约占我国国土面积 1/4 的亚热带季风气候区,丰沛的水热同期且季节 变化显著改变植物生长和土壤微生物活动进而影响 SOC 及其组分(POC 和 MAOC)的形成、转化和稳定。然 而关于亚热带季风区山地森林生态系统凋落物性质、土壤物理—化学过程如何协同调控表层 SOC 的稳定和 积累研究较少。本文选择位于我国南海之滨的莲花山北段气候、母质相似的不同植物群落表层(0—10 cm) 土壤作为研究对象,测量土壤理化参数和 SOC、POC、微团聚体有机碳(Micro-aggregates Carbon, MAC)、MAOC 含量以及<sup>13</sup>C 组成;探究研究区不同植物群落 POC、MAC、MAOC 对 SOC 的相对贡献,识别 SOC 库的稳定性及 其调控因素,为湿热地区土壤碳汇机制研究和我国实现"碳中和"目标提供基础数据。

## 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

莲花山脉绵延于南海之滨的广东省东部。研究区(阴那山)位于莲花山脉东北端(24°21′43″—24°25′38″N, 116°21′33″—116°25′39″E),为褶皱—断块山地,坡度较陡,基岩组成以侏罗系石英砂岩、粉砂岩和泥岩为主。 研究区地处南亚热带—中亚热带季风气候过渡区,多年平均气温为21.1℃,最冷月(1月)平均气温为11.8℃, 最热月(7月)平均气温为28.5℃。多年平均降水量为1441.3 mm,干季(10月—次年3月)与湿季(4月— 9月)降水量差异明显。研究区植被类型以南亚热带山地常绿阔叶林为主,垂直分异显著,群落类型多样,受 海拔高度和人类活动耦合影响,500 m—800 m 之间,随海拔升高依次分布柚子林、茶树园、南亚热带常绿阔叶 林和竹林;800 m—1100 m 分布南亚热带常绿阔叶林、针阔叶混交林、常绿阔叶灌木林;1100 m 以上为稀疏矮 灌丛草甸。研究区随海拔升高依次发育山地红壤、山地黄壤和山地灌丛草甸土等。

## 1.2 样品采集和分析

选取阴那山自然林(常绿阔叶灌木林(GC)、常绿阔叶林(自然林 A, ZMA; 自然林 B, ZMB))和人工经济 林(竹林(ZL)、茶树(CS)和柚子林(YZL))等6个群落(图1),分别于2021年8月(湿季)和2022年1月(干 季)在每个群落样地沿"V"字形设置3个间隔大于20m的样点,每个样点挖剖面采集表层(0—10 cm)土壤样 品;用剪刀采集样地范围内即将凋落的枯黄植物叶片(样地信息详见表1);将土壤样品带回实验室风干,剔除 土壤中碎石和植物根系,过2mm筛,待后续处理测量土壤物理、化学特性。用纯净水冲洗植物样品,然后在 通风烘箱烘干(60℃)、磨碎,待后续处理测量其物理、化学特性。

## 1.2.1 土壤理化性质测量

使用环刀采集研究区土壤容重和含水率样品,用烘干法(105℃)测定、计算土壤容重和含水率;土壤 pH 值使用酸度计测定( $\pm:$ 水=1:2.5);使用便携式多参数水质检测仪测量土壤电导率( $\pm:$ 水=1:5);分别使用双 氧水( $H_2O_2$ , 30%)溶液和盐酸(HCl, 1 mol/L)溶液去除土壤样品的有机质和碳酸盐,再加入六偏磷酸钠 (( $NaPO_3$ )<sub>6</sub>,0.05 mol/L)溶液使土粒分散,使用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定土壤粒度。取灼烧后的土壤 与四硼酸锂( $Li_2B_4O_7$ ,质量比为 1:8)混合烧制玻璃溶片,使用高分辨率 ZSX Primus X 射线荧光光谱仪 (XRF)测定土壤中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量。

## 1.2.2 土壤有机碳及其组分、稳定碳同位素组成测量

经过预处理的土壤样品,使用 Vario EL cube 元素分析仪测定土壤有机碳(SOC)和总氮(TN)含量;使用 湿法筛分仪,运用粒度—密度(聚钨酸钠溶液,1.85 g/cm<sup>3</sup>)分馏技术将土壤样品分为:颗粒态有机碳 (Particulate Organic Carbon,POC,>53  $\mu$ m)、微团聚体有机碳(Micro-aggregates Carbon,MAC,53—250  $\mu$ m)和 矿物结合态有机碳(Mineral-Associated Organic Carbon,MAOC,<53  $\mu$ m)三组分<sup>[21]</sup>,使用 Vario EL cube 元素分 析仪测定各组分有机碳含量。所有土壤样品和植物叶片的稳定碳同位素组成( $\delta^{13}$ C)均使用连续流稳定同位 素质谱仪(Isoprime 100,德国 Elementar)测定(采用 VPDB 标准,测试精度为 0.2‰)。



#### 图1 采样点位置和土壤性质

#### Fig.1 The location of sampling sites and soil properties

GC:常绿阔叶灌木林 Evergreen broadleaved shrub forest; ZMA:自然林 A Natural forest A; ZMB:自然林 B Natural forest B; ZL:竹林 Bamboo forest; CS:茶树 Tea forest; YZL:柚子林 Pomelo forest; 含量图中小写字母代表不同植物群落之间相应值差异的显著性水平(Tukey 检验, P<0. 05),相同字母表示不同植物群落之间没有显著差异

Table 1 Characteristics of the sample plots					
样地 Site	地理位置 Location	海拔 Altitude/m	植被 vegetation	优势种 Dominant species	土壤质地 Soil texture
常绿阔叶灌木林 Evergreen broadleaved shrub forest	116°25′3″E 24°23′52″N	1100	灌木	吊钟花(Enkianthus quinquef lorus)、乌饭 树 (Vaccinium bracteatum)、山 芝 麻 (Helicteres angustifolia)、野 牡 丹 (Melastoma candidum)乌药(Lindera strychnifolia)、柃木(Eurya japonica)	砂质壤土
自然林 A Natural forest A	116°24′50″E 24°23′59″N	920	针阔叶混交林	甜槠 ( Castanopsis eyrei )、木荷 ( Schima superba )、缺 萼 枫 香 ( Liquidambar acal ycina )、红 翅 槭 ( Acer fabri )、马 尾 松 ( Pinus massoniana )	砂质壤土
自然林 B Natural forest B	116°24′25″E 24°24′3″N	865	针阔叶混交林		砂质壤土
竹林 Bamboo forest	116°24′37″E 24°24′4″N	786	经济林	毛竹(Phyllostachys pubescens)	砂质壤土
茶树 Tea forest	116°24′18″E 24°24′15″N	593	经济林	茶树(Camellia sinensis)	砂质黏壤土
柚子林 Pomelo forest	116°24′5″E 24°24′20″N	531	经济林	柚子树(Citrus maxima)	黏壤土

## 表1 样地特征

## 1.3 数据处理

运用 Origin 和 SPSS(27)软件分析不同植物群落 SOC 及其组分的时空差异性,不同植物群落间差异采用 单因素方差分析(One-Way-ANOVA)中的 Tukey 法检验差异显著性,季节差异采用 Wilcoxon 符号秩检验;运用 Mantel test 相关性分析识别研究区不同因子对 SOC 及其组分的影响程度。

定义土壤有机碳的 δ<sup>13</sup>C 值与凋落物 δ<sup>13</sup>C 值的比值为 SOC 的累积效率(Soil Organic Carbon Accumulation Efficiency, SAE)<sup>[12]</sup>。其计算公式为:

$$SAE = \frac{\delta_{soil}^{13} C}{\delta_{plant}^{13} C}$$
(1)

SAE 的大小可以揭示研究区植物碳转化为 SOC 的累积状况, SAE 越大, SOC 越稳定, SOC 的累积效率越高, 反之亦反。

1.4 经济林群落田间管理措施

研究区人工经济林群落包括竹林(ZL)、茶树(CS)和柚子林(YZL)。ZL 群落除了采摘竹笋外,没有其他 人为活动。CS 群落田间管理包括除草、施肥、喷灌和每年春季、秋季分别采摘茶叶1次。YZL 群落田间管理 包括除草、施肥、喷洒农药、修剪枝条和收获柚子。

## 2 结果与分析

2.1 不同植物群落土壤性质和土壤有机碳及其组分的季节变化

研究区表层土壤 pH 变化于 3.55—5.11 之间,平均值为 4.29;不同植物群落土壤 pH 差异显著(P<0.01)、季节差异明显(P<0.05);土壤水分含量变化于 16.14%—34.42%之间,不同植物群落土壤水分含量差异明显 (P<0.01)、季节差异不显著(P>0.05);土壤总氮(TN)含量变化于 1.10—5.50 g/kg之间,不同植物群落土壤 TN 差异明显(P<0.01)、季节差异明显(P<0.05);土壤黏粒含量变化于 0.68%—16.8%之间,其中 CS 土壤黏粒 含量最高(9.45%),YZL 黏粒含量为 8.14%,不同植物群落土壤黏粒含量差异不明显(P>0.05)(图 1)。

研究区 SOC 含量变化于 10.00—79.40 g/kg 之间,平均值为 28.93 g/kg,高于我国南北过渡带的 SOC 含量 (21.49 g/kg)<sup>[28]</sup>。研究区 ZMA 群落 SOC 含量较高,YZL 群落 SOC 含量最低(P<0.01);SOC 含量季节变化不显著(P>0.05),图 2)。





Fig.2 Seasonal variations of SOC content and its composition in the different plant communities

SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; POC:颗粒态有机碳 Particulate organic carbon; MAOC:矿物结合态有机碳 Mineral - associated organic carbon

研究区不同植物群落 SOC 各组分含量存在差异。其中 POC 含量变化于 8.12—42.72 g/kg 之间,平均值 可达 29.29 g/kg。POC 最高值出现在 ZMA 样地,最小值出现在 YZL 样地(P<0.01),除 GC 样地外,POC 含量 呈现湿季显著大于干季(P<0.05,图 2)。MAOC 含量变化幅度(变化于 2.55—9.94 g/kg 之间)较小,且季节变 化不明显(P>0.05);ZMA 样地 MAOC 含量较高, CS 样地最低(图 2)。

比较发现,研究区自然林地 SOC、POC 和 MAOC 含量均高于经济林地的相应值(GC 样地除外),所有样地 POC 含量显著高于 MAOC 含量(P<0.01)(图 2),而且 POC 平均占 SOC 的比例高达 80.74%(YZL 为

65.50%), MAOC 平均占 SOC 的比例为 19.26% (YZL 为 34.50%, 图 3)。显然, POC 是研究区 SOC 的主要组分。这与中国东部和南部地区土壤 POC 含量较高, 北方地区土壤 MAOC 含量较高的研究结果一致<sup>[29]</sup>。

研究区微团聚体有机碳(MAC)含量变化于 5.85—23.09 g/kg之间,而且 MAC 含量占 SOC 含量的比例变 化于 43.44%—53.74%之间,平均值为 46.42%。除 GC 样地外,不同植物群落 MAC 占 SOC 的比例没有显著差 别(P<0.001,图 3)。研究区土壤 MAC 含量占 POC 含量的比例变化于 53.16%—67.18%之间(图 3),平均值 为 59.37%。





## 2.2 凋落物与土壤 C:N

研究区植物凋落叶片 C:N 变化于 13.04—34.42 之间,平均值为 23.33±7.27,土壤 SOM 的 C:N 变化于 5.74—20.33 之间,平均值为 12.06±3.41。SOM 的 C:N 与凋落物 C:N 呈极显著正相关关系(*P*<0.001)。其中, ZMA 样地 C:N 最大(15.14),YZL 样地 C:N 最小(9.05),且自然林(GC、ZMA 和 ZMB)群落凋落物和土壤 C:N 均高于经济林(ZL、CS 和 YZL)的相应值(图 4);POM 的 C:N 变化于 10.83—18.86 之间,平均值为 14.27± 2.79,POM 的 C:N 与 SOM 的 C:N 呈极显著正相关关系(*P*<0.001)(图 4)。

3 讨论

土壤有机碳(SOC)的驻留和稳定有助于缓解气候变化。探究 SOC 的稳定机制越来越重要<sup>[4,18]</sup>。植物凋 落物的化学组成和土壤微生物特性的差异制约植物碳和微生物源碳对 SOC 的差异贡献<sup>[30]</sup>。土壤环境因素 (pH、TN、质地、金属氧化物等)、气候变化和人类活动等通过影响植物凋落物、根系分泌物和微生物代谢过程 而成为 SOC 形成、转化和稳定的主要影响因素。对于表层土壤,植物碳输入和矿物保护(包括黏土颗粒、铁铝 氧化物和交换性钙等因素)对微生物残体碳的积累起到重要作用<sup>[31]</sup>。

3.1 土壤理化性质对有机碳积累和稳定的影响

3.1.1 土壤黏粒对有机碳稳定的作用

土壤黏粒通过吸附过程形成黏土—腐殖质复合体保护 SOC 免受微生物分解,促使 SOC 积累和稳定<sup>[3]</sup>。 比较发现,研究区 SOC 和 POC 含量均与黏粒含量呈负相关关系(图 5),与同一气候区内其他森林土壤的研究 结果一致<sup>[3]</sup>。然而,稳定的 MAOC 含量与黏粒含量呈显著正相关关系(*P*<0.05,CS 除外),而且自然林土壤 MAOC 含量随黏粒含量的变化大于经济林土壤的相应变化(图 6),一致于化学风化强度增加,MAOC 含量增 加<sup>[7]</sup>。茶园(CS)土壤黏粒含量最高,MAOC 含量最低(图 6)。这可能是由于茶园采摘活动和管理造成凋落 物单一且输入减少、微生物活动减弱所导致。

## 3.1.2 微团聚体对土壤有机碳稳定的影响

近年来,土壤团聚体被认为是 SOC 稳定的重要机 制之一。表层土壤中发生的团聚和分散过程产生土壤 团粒,形成团聚体。根据粒径大小,土壤团聚体通常被 分为大团聚体(8000-250 µm)和微团聚体(250 µm-53 µm)<sup>[21]</sup>。土壤团聚体可通过调控微生物代谢活动 和影响不同种类微生物间的相互作用而干扰 SOC 的转 化与稳定<sup>[32-33]</sup>。此外,土壤团聚体能够将 SOC 包裹起 来,通过空间上的物理隔离保护 SOC 免受微生物的分 解利用[8,34]。本研究区土壤微团聚体组分有机碳含量 平均占 POC 含量的 59.37%,且不同植物群落间差异不 大(图 3),揭示研究区 POC 组分较为稳定。佐证了 POC 是 SOC 库中持久性功能组分的结论<sup>[9]</sup>。这是由于 在微团聚体内随着孔隙度的减少,水分和氧气含量降 低,微生物对有机碳的分解只能依靠胞外酶向基质的扩 散或基质向胞外酶的扩散来进行,此过程耗能极大,因 而阻碍了微生物对微团聚体包裹的有机碳的分解<sup>[9]</sup>。 相比较,研究区自然林 SOC、MAC 和 MAOC 含量较经济 林高,这可能是由于自然林地乔木、灌木和草本物种组 成较多且覆盖度较高,调落物多且成分复杂,在新近调 落物表面微生物产物(胞外聚合物)驱动细粒级矿物的 黏合导致在凋落物—土壤界面上直接形成土壤团聚体 所导致<sup>[9]</sup>。经济林中 YZL 土壤 MAOC 占 SOC 比例最 高,这可能是 YZL 林下较多易分解的草本植物凋落物 输入、土壤较高的黏土含量(8.14%)<sup>[22]</sup>以及林地的土 壤施肥和免耕管理措施有助于微生物残体碳形成[35]协 同作用的结果。

## 3.1.3 土壤铁铝氧化物对稳定土壤有机碳的作用

"土壤矿物—有机质"作用可降低微生物的可及性和分解可利用性,被认为是 SOC 持续积累和稳定的关键机制之一<sup>[3,36–37]</sup>。研究区 SOC、POC 和 MAOC 与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>之间呈显著正相关关系(CS 除外,*P*<0.01,图 5 和图 6),揭示研究区土壤 Fe 和 Al 氧化物对 SOC 积累和稳定起重要作用。这一结果与同纬度同一气候类型的针阔叶混交林和阔叶林土壤<sup>[3]</sup>以及温带森林土





壤<sup>[7]</sup>的研究结果一致。研究区自然林土壤 MAOC 含量随 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的变化显著大于经济林土壤的相应变化(图 6)。这是由于经济林土壤较低的 SOC 含量抑制了 SOC 与土壤铁和铝氧化物的结合,同时减少酶的合成<sup>[38]</sup>。

研究区 SOC 及其组分与铁氧化物之间的正相关关系(图 5)揭示研究区铁氧化物的化学稳定性远没达到 饱和。地壳中丰度位居第4的铁元素,其氧化还原性质活泼,在土壤中主要以氧化铁的形式存在。氧化铁的 比表面积大、吸附能力强<sup>[39-40]</sup>,保护 SOC 主要通过以下两种方式:(1)减少内源有机碳的矿化:通过形成土

7





## Fig.5 Mantel test results of influencing factors on soil organic carbon and its functional components

TN:总氮 Total nitrogen;C:N(P):碳氮比(植物叶片)C:N ratio (plant leaf);BD:土壤容重 Soil bulk density;SWC:土壤含水率 Soil water content;EC:电导率 Electrical conductivity;方块颜色代表相关性绝对值大小,\*\*\*、\*\* 、\*\* 分别表示 P<0.001、P<0.01 和 P<0.05 显著性

壤大团聚体将有机碳包裹在团聚体内,从而减少微生物和胞外酶对 SOC 的降解;(2)增加外源有机碳的固持:通过吸附、共沉淀作用和外源有机碳紧密结合<sup>[41]</sup>,其中吸附主要包括配位体交换和阳离子架桥机制<sup>[42]</sup>,而共沉淀主要是促进闭蓄态有机碳的形成<sup>[43]</sup>。迄今关于 MAOC 的饱和限制<sup>[44]</sup>尚未报道,稳定的 MAOC 组分依然存在较大的固碳潜力<sup>[45]</sup>。湿热地区 SOC 的长期稳定性与土壤富含铁铝氧化物有关<sup>[46-47]</sup>。湿热地区强



图 6 MAOC 随黏粒、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的变化 Fig.6 The variation of MAOC with the content of clay, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

烈的化学风化过程是吸收大气 CO<sub>2</sub>的碳汇过程<sup>[48]</sup>,同时土壤中的硅酸盐矿物发生分解,硅酸和碱性阳离子大量流失,导致土壤中氧化铁和氧化铝相对富集<sup>[49]</sup>,新增的铁、铝氧化物更加促进 SOC 的埋藏和稳定。

此外,研究区 SOC 和 POC 分别与土壤 pH、容重、TN 和电导率等环境因素存在正相关关系(图 5),表明研 究区 SOC 驻留和稳定受多重土壤环境因子的耦合调控。

3.2 土壤碳氮比(C:N)

由于不同植物物种和植物器官对环境变化的响应不同,凋落物化学组成存在差异。研究区植物凋落物 C :N 变化范围(变化于 13.04—34.42 之间)较大,平均值(23.33±7.27)较高,属于不易被微生物分解的低质量凋 落物,有助于形成颗粒态有机质<sup>[12–13]</sup>。相比较,土壤微生物的 C:N 变化较小,真菌的 C:N 通常变化于 4.5— 15 之间;细菌 C:N 在 3—5 之间<sup>[20]</sup>。研究区土壤 C:N 平均值为 12.06±3.41,处于世界土壤 C:N 平均值(9.9— 25.8)的分布范围内<sup>[50]</sup>。土壤 C:N 大小可以指示 SOC 的驻留和稳定。研究区自然林(GC、ZMA 和 ZMB)土壤 C:N (平均为 14.33)大于经济林(ZL、CS 和 YZL)土壤 C:N (平均为 9.79)(图 4),相应地自然林 SOC 和 POC 含量均高于经济林的相应值(图 2),与土壤 C:N 值高的系统能够积累更多的 SOC 一致<sup>[51]</sup>。

研究区 SOM 的 C:N 与 POM 的 C:N 呈极显著正相关关系(P<0.001,图4),揭示 SOM 和 POM 源自同一物 源;SOM 和 POM 的 C:N (分别为 12.06±3.41 和 14.27±2.79)均低于凋落物的 C:N 值,高于真菌平均 C:N 值,揭示研究区 SOC 和 POC 主要是由真菌通过体外修饰转化的植物凋落物有机碳组成,真菌残体碳次之。一致 于亚热带森林土壤表层(0—10cm)SOC 的积累变化主要由植物碳调控,微生物残体碳的贡献次之<sup>[30]</sup>。通常 情况下森林土壤微生物群落由真菌主导<sup>[52]</sup>,真菌的生长和周转率比细菌慢<sup>[53]</sup>,而且真菌比细菌更能产生富 含芳香结构(如黑色素)的稳定残留物<sup>[34]</sup>。真菌群落性质与植物群落和土壤特性有密切联系。研究表明,我国亚热带常绿阔叶林土壤以外生菌根真菌(Ectomycorrhiza,ECM)占主导地位<sup>[54]</sup>。ECM 森林生态系统土壤中 积累较多的 POM 从而导致这些森林 SOC 储量增加<sup>[51]</sup>。研究区 POC 平均占 SOC 的比例高达 80.74%。可见,

研究区 POC 具有一定的稳定性。

研究区 YZL 土壤 C:N 最小, MAOC 占 SOC 比例最大;自然林土壤 C:N 较高, MAOC 占 SOC 比例却较小 (图 3、图 4)。这是由于凋落物质量差异在一定程度上决定其分解速率的快慢<sup>[10-11]</sup>,最终影响 SOC 的稳定和 积累。C:N 较小的 YZL 凋落物(图 4)属于高质量的植物残体,易被微生物分解<sup>[55]</sup>,并产生具有高吸附亲和力 的氧化中间体<sup>[56]</sup>,通过吸附、氧化还原反应和聚合等过程将不稳定凋落物有机碳直接或间接转化为更稳定的 MAOC<sup>[57]</sup>。此外,研究区凋落物较大的 C:N 比值和变化范围亦揭示研究区多样化的树种组成和低质量的凋 落物均可促进土壤有机质分子结构组成的多样性从而增强 SOC 的稳定性,提高 SOC 库的持久性<sup>[58]</sup>。 **3.3** <sup>13</sup>C 信号示踪的土壤有机碳累积效率

全球尺度上,热带植物叶片 δ<sup>13</sup>C 值变化于-32.1‰—-31.6 ‰之间,亚热带植物叶片 δ<sup>13</sup>C 值变化于-31.1‰—-30.5 ‰之间<sup>[59]</sup>。研究区森林群落主要优势种叶片的 δ<sup>13</sup>C 值变化于-33.68‰—-30.09‰之间,与同一气候区的鼎湖山森林植物叶片的 δ<sup>13</sup>C 值变化范围(-33.37‰—-29.19‰)基本吻合<sup>[60]</sup>, 较波多黎各地区植物叶片的 δ<sup>13</sup>C 值变化范围更宽<sup>[61]</sup>,揭示研究区森林群落物种组成多样化,具有热带—亚热带植被光合作用同化固定 CO<sub>2</sub>的潜力。研究区不同植物群落 SOC 的 δ<sup>13</sup>C 值变化于-27.02‰—-22.55‰之间,平均值为-25.0‰,稍微偏负于鼎湖山森林土壤 δ<sup>13</sup>C 值变化范围(-27.31‰—-21.38‰)<sup>[60]</sup>,揭示研究区 SOC 较鼎湖山SOC 相对稳定。季节尺度上,研究区土壤平均 δ<sup>13</sup>C 值千季(-24.7‰)稍大于湿季(-25.3‰),表明研究区湿季 SOC 相对稳定,与湿季 SOC 含量较高一致(图 2);群落尺度上,自然林土壤平均 δ<sup>13</sup>C 值(-25.30‰)小于经济林土壤平均 δ<sup>13</sup>C 值(-24.65‰),揭示研究区自然林 SOC 相对稳定,一致于自然林 SOC 含量高于人工林的相应值(图 2)。这是由于自然林转化为人工经济林导致 SOC 较快分解的结果。研究区 SOC 含量与 δ<sup>13</sup>C 值呈显著负相关关系(*P*<0.001)。

根据公式(1)计算得出,研究区土壤 SAE 值变化于 0.73—0.83 之间(平均值为 0.79),揭示研究区 SOC 累 积效率较高,SOC 比较稳定。不同植物群落土壤 SAE 值存在极显著差异(P<0.001,图 7):自然林(ZMA、 ZMB)土壤有较高的 SAE 值,揭示自然林群落植物碳转 化为 SOC 并驻留的能力较大,SOC 较稳定而且储量较 大;GC 群落土壤有较小的 SAE 值,一致于 GC 群落 SOC 含量和 MAOC 含量均较低的结果(图 2,图 7),揭示灌 木林群落 SOC 相对不稳定,SOC 储量较少。经济林中 YZL 土壤 SAE 值较大,与 YZL 土壤稳定的 MAOC 含量 较高一致(图 3),揭示 YZL 群落 SOC 相对稳定。季节 尺度上,湿季研究区 SAE 较高,揭示湿季研究区植物碳 转化为 SOC 并驻留,SOC 较稳定。值得注意的是,ZL 和 CS 样地干湿季 SAE 值均呈现显著差异(P<0.01,图





7),揭示 ZL 和 CS 群落湿季土壤微生物转化植物碳为 SOC 的量显著大于分解的植物碳量(图 2)。这可能是 由于湿季竹林和茶园群落土壤表层密集须根的凋落物分解和采摘活动使得凋落物有机质输入显著大于干季 的结果。

## 4 结论

本研究探讨了凋落物性质和土壤物理—化学过程对湿热滨海山地森林 SOC 积累和稳定的影响。获得以下主要结论:

(1)研究区表层 SOC 主要由 POC 组成(占 SOC 的 80.74%)。稳定的 MAC 和 MAOC 占表层土壤 SOC 的

45 卷

比例高达 65.68%; SAE 值(平均为 0.79)较大,揭示研究区表层 SOC 比较稳定。

(2)研究区植物凋落物属于分解较慢的低质量凋落物,而且稳定微团聚体有机碳占 POC 的比例 (59.37%)较高,揭示研究区表层土壤 POC 比较稳定。

(3) SOC 与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>显著正相关(*P*<0.01),揭示土壤铁、铝氧化物形成的有机—无机矿物复合物的理 化保护也是研究区 SOC 稳定的机制之一,随着土壤矿物化学风化过程的持续进行,研究区土壤仍具有持续积 累和稳定 SOC 的潜力。

(4)相比较,研究区 MAOC 含量偏低,可能是由于研究区广布难降解的低质量凋落物和湿季强降雨较多, 坡面径流侵蚀作用使表层粉粒—黏粒组分流失所致。将来对湿热季风区山地森林土壤表层 SOC 的积累和稳 定机制研究,除了考虑凋落物性质和气候—土壤环境因子的协同效应外,还需考虑 SOC 与水文过程(坡面径 流和潜流)之间的耦合效应,尤其对暴雨洪流过程,应测量"坡地—河流"系统河流悬移质的有机碳和 MAOC 含量,以精确评估我国湿热地区山地森林 SOC 的驻留变化,为地球表层系统碳循环模型优化和我国实现"碳 中和"目标提供基础数据。

#### 参考文献(References):

- [1] Chabbi A, Lehmann J, Ciais P, Loescher H W, Cotrufo M F, Don A, SanClements M, Schipper L, Six J, Smith P, Rumpel C. Aligning agriculture and climate policy. Nature Climate Change, 2017, 7: 307-309.
- [2] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, Lang B, von Lützow M, Marin-Spiotta E, van Wesemael B, Rabot E, Ließ M, Garcia-Franco N, Wollschläger U, Vogel H J, Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils: A review of drivers and indicators at various scales. Geoderma, 2019, 333: 149-162.
- [3] Yu M X, Wang Y P, Jiang J, Wang C, Zhou G Y, Yan J H. Soil organic carbon stabilization in the three subtropical forests: importance of clay and metal oxides. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2019, 124(10): 2976-2990.
- [4] Islam M R, Singh B, Dijkstra F A. Stabilisation of soil organic matter: interactions between clay and microbes. Biogeochemistry, 2022, 160(2): 145-158.
- [5] Chen J W, Hu Y L, Hall S J, Hui D F, Li J L, Chen G Y, Sun L W, Zhang D Q, Deng Q. Increased interactions between iron oxides and organic carbon under acid deposition drive large increases in soil organic carbon in a tropical forest in Southern China. Biogeochemistry, 2022, 158(3): 287-301.
- [6] Camenzind T, Mason-Jones K, Mansour I, Rillig M C, Lehmann J. Formation of necromass-derived soil organic carbon determined by microbial death pathways. Nature Geoscience, 2023, 16: 115-122.
- [7] Zhu E X, Liu Z G, Ma L X, Luo J N, Kang E Z, Wang Y, Zhao Y P, Jia J, Feng X J. Enhanced mineral preservation rather than microbial residue production dictates the accrual of mineral-associated organic carbon along a weathering gradient. Geophysical Research Letters, 2024, 51 (6): e2024GL1084666.
- [8] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. Nature, 2015, 528(7580): 60-68.
- [9] Witzgall K, Vidal A, Schubert D I, Höschen C, Schweizer S A, Buegger F, Pouteau V, Chenu C, Mueller C W. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. Nature Communications, 2021, 12(1): 4115.
- [10] Li S T, Lyu M K, Deng C, Deng W, Wang X H, Cao A, Jiang Y M, Liu J L, Lu Y M, Xie J S. Input of high-quality litter reduces soil carbon losses due to priming in a subtropical pine forest. Soil Biology and Biochemistry, 2024, 194: 109444.
- [11] Zheng Y, Hu Z K, Pan X, Chen X Y, Derrien D, Hu F, Liu M Q, Hättenschwiler S. Carbon and nitrogen transfer from litter to soil is higher in slow than rapid decomposing plant litter: a synthesis of stable isotope studies. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 156: 108196.
- [12] Man M L, Pierson D, Chiu R, Tabatabaei Anaraki M, VandenEnden L, Ye R X, Lajtha K, Simpson M J. Twenty years of litter manipulation reveals that above-ground litter quantity and quality controls soil organic matter molecular composition. Biogeochemistry, 2022, 159(3): 393-411.
- [13] Almeida L F J, Souza I F, Hurtarte L C C, Teixeira P P C, Inagaki T M, Silva I R, Mueller C W. Forest litter constraints on the pathways controlling soil organic matter formation. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 163: 108447.
- [14] Liang C, Kästner M, Joergensen R G. Microbial necromass on the rise: the growing focus on its role in soil organic matter development. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 150: 108000.
- [15] Feng X J, Wang S M. Plant influences on soil microbial carbon pump efficiency. Global Change Biology, 2023, 29(14): 3854-3856.
- [16] Wang C, Qu L R, Yang L M, Liu D W, Morrissey E, Miao R H, Liu Z P, Wang Q K, Fang Y T, Bai E. Large-scale importance of microbial

carbon use efficiency and necromass to soil organic carbon. Global Change Biology, 2021, 27(10): 2039-2048.

- [17] Liang C, Zhu X F. The soil Microbial Carbon Pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration. Science China Earth Sciences, 2021, 64 (4): 545-558.
- [18] Xiao K Q, Zhao Y, Liang C, Zhao M Y, Moore O W, Otero-Fariña A, Zhu Y G, Johnson K, Peacock C L. Introducing the soil mineral carbon pump. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4: 135-136.
- [19] Lavallee J M, Soong J L, Francesca Cotrufo M. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. Global Change Biology, 2020, 26(1): 261-273.
- [20] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, Six J, Lugato E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. Nature Geoscience, 2019, 12: 989-994.
- [21] Leuthold S J, Haddix M L, Lavallee J, Cotrufo M F. Physical fractionation techniques//Encyclopedia of Soils in the Environment. Amsterdam: Elsevier, 2023: 68-80.
- [22] Zhang Y X, Guo X W, Chen L X, Kuzyakov Y, Wang R Z, Zhang H Y, Han X G, Jiang Y, Sun O J. Global pattern of organic carbon pools in forest soils. Global Change Biology, 2024, 30(6): e17386.
- [23] Liao J D, Boutton T W, Jastrow J D. Organic matter turnover in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland: Evidence from natural <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(11): 3197-3210.
- [24] Gunina A, Kuzyakov Y. Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: Implications from <sup>13</sup>C natural abundance. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 71: 95-104.
- [25] Qin S Q, Zhang D Y, Wei B, Yang Y H. Dual roles of microbes in mediating soil carbon dynamics in response to warming. Nature Communications, 2024, 15(1): 6439.
- [26] Li Y Z, Bao X L, Tang S X, Xiao K Q, Ge C J, Xie H T, He H B, Mueller C W, Liang C. Toward soil carbon storage: The influence of parent material and vegetation on profile-scale microbial community structure and necromass accumulation. Soil Biology and Biochemistry, 2024, 193: 109399.
- [27] 樊子豪,崔鸿侠,沈琛琛,陈吉臻,肖文发,刘常富,黄志霖.神农架林区天然次生林土壤有机碳分布及影响因素.生态学报,2024,44 (16):7130-7139.
- [28] 张俊华,朱连奇,李国栋,赵芳,秦静婷.中国南北过渡带土壤碳氮空间特征及暖温带与亚热带界限.地理学报,2021,76(9): 2269-2282.
- [29] Wang X Y, Yu D S, Xu Z C, Pan Y, Pan J J, Shi X Z. Regional patterns and controls of soil organic carbon pools of croplands in China. Plant and Soil, 2017, 421(1): 525-539.
- [30] Jia Y F, Zhai G Q, Zhu S S, Liu X J, Schmid B, Wang Z H, Ma K P, Feng X J. Plant and microbial pathways driving plant diversity effects on soil carbon accumulation in subtropical forest. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 161: 108375.
- [31] He M, Fang K, Chen L Y, Feng X H, Qin S Q, Kou D, He H B, Liang C, Yang Y H. Depth-dependent drivers of soil microbial necromass carbon across Tibetan alpine grasslands. Global Change Biology, 2022, 28(3): 936-949.
- [32] Liu S, Six J, Zhang H X, Zhang Z B, Peng X H. Integrated aggregate turnover and soil organic carbon sequestration using rare earth oxides and <sup>13</sup>C isotope as dual tracers. Geoderma, 2023, 430: 116313.
- [33] Zhang W J, Munkholm L J, Liu X, An T T, Xu Y D, Ge Z, Xie N H, Li A M, Dong Y Q, Peng C, Li S Y, Wang J K. Soil aggregate microstructure and microbial community structure mediate soil organic carbon accumulation: Evidence from one-year field experiment. Geoderma, 2023, 430: 116324.
- [34] Lützow M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, Matzner E, Guggenberger G, Marschner B, Flessa H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions: a review. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 426-445.
- [35] Zhou R R, Liu Y, Dungait J A J, Kumar A, Wang J S, Tiemann L K, Zhang F S, Kuzyakov Y, Tian J. Microbial necromass in cropland soils: a global meta-analysis of management effects. Global Change Biology, 2023, 29(7): 1998-2014.
- [36] Zhao M Y, Mills B J W, Homoky W B, Peacock C L. Oxygenation of the Earth aided by mineral-organic carbon preservation. Nature Geoscience, 2023, 16: 262-267.
- [37] Guo X W, Viscarra Rossel R A, Wang G C, Xiao L J, Wang M M, Zhang S, Luo Z K. Particulate and mineral-associated organic carbon turnover revealed by modelling their long-term dynamics. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 173: 108780.
- [38] Liu L, Gundersen P, Zhang W, Zhang T, Chen H, Mo J M. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil microbial biomass and community structure in two reforested tropical forests. Scientific Reports, 2015, 5: 14378.
- [39] Eusterhues K, Rumpel C, Kögel-Knabner I. Organo-mineral associations in sandy acid forest soils: importance of specific surface area, iron oxides and micropores. European Journal of Soil Science, 2005, 56(6): 753-763.

- [40] Kaiser K, Mikutta R, Guggenberger G. Increased stability of organic matter sorbed to ferrihydrite and goethite on aging. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(3): 711-719.
- [41] Lalonde K, Mucci A, Ouellet A, Gélinas Y. Preservation of organic matter in sediments promoted by iron. Nature, 2012, 483(7388): 198-200.
- [42] 徐基胜,赵炳梓.可溶性有机碳在典型土壤上的吸附行为及机理.土壤,2017,49(2):314-320.
- [43] 王璐莹,秦雷,吕宪国,姜明,邹元春. 铁促进土壤有机碳累积作用研究进展. 土壤学报, 2018, 55(5): 1041-1050.
- [44] Begill N, Don A, Poeplau C. No detectable upper limit of mineral-associated organic carbon in temperate agricultural soils. Global Change Biology, 2023, 29(16): 4662-4669.
- [45] Georgiou K, Jackson R B, Vindušková O, Abramoff R Z, Ahlström A, Feng W T, Harden J W, Pellegrini A F A, Wayne Polley H, Soong J L, Riley W J, Torn M S. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. Nature Communications, 2022, 13(1): 3797.
- [46] Kramer M G, Chadwick O A. Climate-driven thresholds in reactive mineral retention of soil carbon at the global scale. Nature Climate Change, 2018, 8: 1104-1108.
- [47] Doetterl S, Stevens A, Six J, Merckx R, Van Oost K, Casanova Pinto M, Casanova-Katny A, Muñoz C, Boudin M, Zagal Venegas E, Boeckx P. Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate. Nature Geoscience, 2015, 8: 780-783.
- [48] Beerling D J, Kantzas E P, Lomas M R, Wade P, Eufrasio R M, Renforth P, Sarkar B, Grace Andrews M, James R H, Pearce C R, Mercure J F, Pollitt H, Holden P B, Edwards N R, Khanna M, Koh L, Quegan S, Pidgeon N F, Janssens I A, Hansen J, Banwart S A. Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. Nature, 2020, 583(7815): 242-248.
- [49] Houlton B Z, Morford S L, Dahlgren R A. Convergent evidence for widespread rock nitrogen sources in Earth's surface environment. Science, 2018, 360(6384): 58-62.
- [50] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 10-21.
- [51] Averill C, Turner B L, Finzi A C. Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage. Nature, 2014, 505 (7484): 543-545.
- [52] Thevenot M, Dignac M F, Rumpel C. Fate of lignins in soils: a review. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(8): 1200-1211.
- [53] Kaiser C, Franklin O, Dieckmann U, Richter A. Microbial community dynamics alleviate stoichiometric constraints during litter decay. Ecology Letters, 2014, 17(6): 680-690.
- [54] Chen L, Xiang W H, Wu H L, Ouyang S, Lei P F, Hu Y J, Ge T D, Ye J, Kuzyakov Y. Contrasting patterns and drivers of soil fungal communities in subtropical deciduous and evergreen broadleaved forests. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(13): 5421-5433.
- [55] Francesca Cotrufo M, Wallenstein M D, Boot C M, Denef K, Paul E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? Global Change Biology, 2013, 19(4): 988-995.
- [56] Kramer M G, Sanderman J, Chadwick O A, Chorover J, Vitousek P M. Long-term carbon storage through retention of dissolved aromatic acids by reactive particles in soil. Global Change Biology, 2012, 18(8): 2594-2605.
- [57] Zhang Y X, Tang Z X, You Y M, Guo X W, Wu C J, Liu S R, Sun O J. Differential effects of forest-floor litter and roots on soil organic carbon formation in a temperate oak forest. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 180: 109017.
- [58] Hemingway J D, Rothman D H, Grant K E, Rosengard S Z, Eglinton T I, Derry L A, Galy V V. Mineral protection regulates long-term global preservation of natural organic carbon. Nature, 2019, 570(7760): 228-231.
- [59] 渠春梅, 韩兴国, 苏波, 黄建辉, 蒋高明. 云南西双版纳片断化热带雨林植物叶片 δ<sup>13</sup>C 值的特点及其对水分利用效率的指示. 植物学报, 2001, 43(2): 186-192.
- [60] 熊鑫, 张慧玲, 吴建平, 褚国伟, 周国逸, 张德强. 鼎湖山森林演替序列植物-土壤碳氮同位素特征. 植物生态学报, 2016, 40(6): 533-542.
- [61] von Fischer J C, Tieszen L L. Carbon isotope characterization of vegetation and soil organic matter in subtropical forests in luquillo, Puerto Rico. Biotropica, 1995, 27(2): 138.