

· 热带植物 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdxswb.20230096



主持人:徐 冉

短期降水减少对海南橡胶林土壤有机碳矿化及有机碳组分的影响

孙玉娟, 钟丽爽, 杨小波, 张 翔

(海南大学 生态与环境学院, 海口 570228)

摘 要: 为了探究短期降水减少对不同土层有机碳矿化速率及其碳组分变化的影响, 以海南典型人工林类型橡胶林土壤为研究对象, 通过搭建野外隔离穿透雨控制平台, 并结合室内恒温培养实验, 测定了不同降水条件下土壤有机碳矿化速率及有机碳组分等参数。结果表明: 短期降水减少导致0~10 cm土层中SOC累积矿化量、矿化率及微生物代谢熵($q\text{CO}_2$)显著降低; 土壤易氧化有机碳(EOC)、微生物生物量碳(MBC)及惰性有机碳(NEOC)的含量均随土壤含水量的降低而降低, 但仅对0~10 cm土层的EOC影响显著; 相关分析表明, 土壤SOC累积矿化量及SOC矿化率均与土壤碳氮含量(SOC、TN)、各碳组分含量(EOC、MBC、NEOC)、 $q\text{CO}_2$ 呈显著正相关。总之, 短期降水减少会抑制橡胶林土壤SOC的矿化, 这一变化可能与不同水分条件下土壤基质供应的有效性及其微生物代谢的变化有密切关系。

关键词: 橡胶林; 土壤含水量; 土壤有机碳组分; 微生物代谢熵

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-7054 (2024) 03-0272-09

孙玉娟, 钟丽爽, 杨小波, 等. 短期降水减少对海南橡胶林土壤有机碳矿化及有机碳组分的影响 [J]. 热带生物学报, 2024, 15(3): 272-280. doi: 10.15886/j.cnki.rdxswb.20230096

全球变暖导致降水格局发生显著改变, 热带及亚热带地区发生极端降水事件和长期干旱的强度都将随着气温的上升而增加^[1]。土壤是陆地生态系统中最大的碳库, 对调节碳循环过程和气候变化具有重要作用, 而全球变暖背景下降水格局的改变, 会通过改变土壤水分影响有机碳(SOC)矿化, 进而对土壤碳循环及碳储存过程造成影响^[2-3]。在干旱地区, 土壤SOC的矿化往往对增加的水分更敏感; 在潮湿地区, 对水分的减少更敏感^[4], 然而, 也有学者发现, 水分含量的变化对土壤SOC矿化的影响并不显著^[5], 而目前关于水分条件改变对土壤SOC矿化的影响尚无统一的认识。在现阶段的实验室水分模拟实验中, 大多数研究者主要采用人工设置不同的土壤水分梯度, 以探究土壤SOC矿化对于水分的响应, 但实际上野外的环境条件

较为复杂, 土壤水分与土壤SOC矿化之间的关系还受到野外取样点实际含水量的影响^[6]。目前针对野外实际含水量差异, 采用室内培养还原野外原位水分差异对土壤SOC矿化的相关研究还较少。土壤有机碳分为活性有机碳和惰性有机碳^[7]。活性有机碳易被微生物分解, 是土壤SOC矿化过程中的有效基质, 活性有机碳往往比SOC更能反映土壤有机碳矿化的变化。可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)和微生物生物量碳(MBC)均属于SOC中周转较快的活性碳组分, 可有效反映土壤SOC矿化的变化^[8]。由于活性有机碳组分对环境变化非常敏感, 因此, 可以作为一项重要指标来衡量土壤SOC对气候变化的响应。全球范围内日益严重的干旱事件不仅发生在干旱和半干旱气候地区, 即使降水相对充沛的热带地区也可能遭

收稿日期: 2023-08-16

修回日期: 2023-12-20

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目(423RC437)

第一作者: 孙玉娟(1991-), 女, 海南大学生态与环境学院2021级硕士研究生。E-mail: 21220951320153@hainanu.edu.cn

通信作者: 张翔(1988-), 男, 讲师。研究方向: 生态系统生态学与土壤生态学。E-mail: 993762@hainanu.edu.cn

受暂时性的缺水压力,引发热带雨林的退化以及生物多样性的降低^[9],从而也将对生态系统碳循环及碳固存过程产生重要影响。橡胶林在中国热带地区森林生态系统碳循环中起着关键作用,海南岛是中国第二大植胶区,橡胶林总面积占海南岛森林总面积的四分之一以上,是海南最大的人工林生态系统^[10],其碳汇能力不容忽视。一项在西双版纳人工橡胶林内持续监测15年的径流监测数据表明,大面积种植橡胶林将导致西双版纳旱季降水减少,从而影响到热带雨林及其生物多样性的维持^[11],这对于在海南橡胶林种植区开展旱季降水减少控制实验也具有一定现实意义。因此,本研究以海南热带地区典型人工林类型橡胶林土壤为研究对象,利用野外隔离穿透雨控制平台,通过室内培养实验模拟野外不同降水条件下(原位含水量)土壤有机碳矿化特征和有机碳组分的变化趋势,从而探究土壤有机碳矿化及其碳组分对降水变化的响应规律,旨在为有效减少土壤碳排放、充分发挥其碳汇效应提供科学依据和理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况 研究区位于海南省白沙县南开乡热带雨林国家公园内的人工林(109°18'11''E, 18°59'41''N),样地海拔489 m,土壤类型主要为砖红壤,当地属热带季风气候,高温多雨,年均气温22.7℃,最冷月通常出现在1月,月均最低温为16℃左右,最热月通常出现在6月,月均最高温约为33.8℃,年均降雨量1725 mm,区内雨量存在差异,主要表现在东南部多雨,西北部少雨,干、湿季节较为明显^[12]。研究区域的林型为橡胶林,以人工林为主,林下植被优势种为芒萁(*Dicranopteris dichotoma*),益智(*Alpinia oxyphylla*),野茛蒿(*Crassocephalum crepidioides*),地毯草(*Axonopus compressus*),金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*),乔木主要为银柴(*Aporosa dioica*),假柿木姜子(*Litsea monopetala*),灌木主要为鲫鱼胆(*Maesa perularius*)。

1.2 样地设置 2022年10月,在研究区南部选择立地条件基本一致的人工林类型橡胶林作为研究对象,在林内选取相距约200 m且坡度相同、环境一致的3个重复样地,每个样地内搭建4个面积为2 m×2 m、距地高度约1 m的透明遮雨棚作为完全隔离穿透雨处理样方,遮雨棚上方布置等面积的

尼龙网用来收集凋落物,并定期将收集的凋落物回归于遮雨棚内,以避免碳输入的变化。样方四周用挡板围起,挡板插入土壤30 cm,漏出地表10 cm左右,以防止降雨时样方外土壤地表径流进入遮雨棚内。在隔离穿透雨样方附近相距5 m处选取相同面积作为对照样方。

1.3 土壤样品采集 挡板搭建完成后,于2023年2月前往野外实验样地,对3个重复样地内对照组、遮雨组2个水分处理按不同土层(0~10, 10~20 cm)取土样,之后分别将每个样地内采集的4个样方的土壤样本,按照不同处理各混合为2个重复土壤样本,即每种处理共得到6个重复样品,在实验室内进行相应处理后,一部分土壤样品自然风干后用于测定基本理化性质,另一部分鲜土用于立即测定土壤含水量、DOC、MBC及室内培养实验。

1.4 土壤指标测定 土壤含水量(SWC)采用烘干法测定;有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾-外加热法测定,全氮(TN)含量的测定采用半微量凯氏定氮法,全磷(TP)含量的测定采用钼锑抗比色法^[13];土壤pH使用酸度计采用电位法进行测定;土壤EOC采用KMnO₄氧化法测定^[14];DOC使用K₂SO₄浸提后,采用总有机碳分析仪测定^[15];MBC采用氯仿熏蒸提取法测定^[16];土壤惰性有机碳NEOC含量为SOC与EOC之差^[13]。本研究在进行野外穿透雨控制实验之前,测定了样地土壤基本理化性质(表1)。

1.5 土壤培养实验 本实验共培养了24个土壤样品(土壤深度和水分处理各2个,重复6次)。土壤培养前,从每个处理的每个重复中称取过2 mm筛的鲜土150 g置于培养瓶中,随后将所有培养样品均放入20℃恒温培养箱中进行培养,先在恒温培养箱中预培养一周,以减少微生物活性的变化,在预培养后的第1、2、3、5、7、10、14、21天使用SBA-5型CO₂气体分析仪测定CO₂浓度。在整个培养期间,通过称重法每隔1 d给土壤样品补1次水,使其水分含量与野外实际采样时的含水量保持一致(土壤样品带回实验室后立即测定的土壤含水量)。

1.6 数据处理与分析 土壤有机碳矿化速率的计算公式如下^[17-18]:

$$R_s = k \times \frac{V}{m} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \times \alpha,$$

式中: R_s 为有机碳矿化速率($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); k 为标准气体质量密度($1.964 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); V 表示培养瓶与仪器气

表1 土壤理化性质

Tab. 1 Soil physical And chemical property

| 土壤理化性质 Physical and chemical properties of soil | 0 ~ 10 cm | | 10 ~ 20 cm | |
|---|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| | 对照 Compare | 遮雨 Shelter from rain | 对照 Compare | 遮雨 Shelter from rain |
| 含水量/% Soil moisture | 33.99±0.98Aa | 33.42±1.18Aa | 31.36±0.87Aa | 29.21±0.53Ab |
| pH | 4.83±0.08Aa | 4.86±0.08Aa | 4.80±0.07Aa | 4.90±0.05Aa |
| 土壤有机碳/(g·kg ⁻¹) Soil organic carbon | 15.59±0.31Aa | 13.78±0.63Aa | 10.63±0.34Ab | 12.20±0.68Aa |
| 土壤全氮/(g·kg ⁻¹) Soil total nitrogen | 1.35±0.02Aa | 1.30±0.01Aa | 1.07±0.04Aa | 0.97±0.09Aa |
| 土壤全磷/(g·kg ⁻¹) Soil total phosphorus | 0.32±0.08Aa | 0.28±0.02Aa | 0.26±0.02Aa | 0.22±0.01Aa |

注:以上数值为平均值±标准误差,数据表中同行不同大写和小写字母分别代表相同土层降水处理间差异显著及相同降水处理不同土层间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: The above values are the mean ± standard error, and different capital and lower case letters in the data table represent significant differences between precipitation treatments of the same soil layer and significant differences between different soil layers of the same precipitation treatment, respectively ($P<0.05$); the same below.

管的总体积(m^3); m 表示土壤质量(kg); $\Delta c/\Delta t$ 为 CO_2 浓度变化的直线斜率($mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$); T 为培养温度, α 为 CO_2 气体转化为C的转换系数,其值为12/44。

土壤SOC累积矿化量($mg \cdot kg^{-1}$)为土壤样品从培养开始到某个时间点释放的 CO_2 总和;有机碳矿化率CME($mg \cdot g^{-1}$)为SOC累积矿化量与SOC含量的比值^[8];土壤微生物代谢熵 qCO_2 ($mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)为有机碳矿化速率与微生物生物量碳的比值^[19]。

不同处理之间的差异性检验使用独立样本t检验(t-test)进行分析,采用双因素方差(Two-way ANOVA)分析降水处理和土层深度对SOC累积释放量及SOC矿化率的影响,使用斯皮尔曼相关系数分析土壤SOC累积矿化量与有机碳组分等土壤因子的相关性。以上数据的分析主要使用SPSS

26.0软件完成,制图使用Origin 2021版软件。

2 结果与分析

2.1 短期降水减少对土壤理化性质的影响

独立样本t检验分析结果(表2)表明,不同土层中,遮雨处理的土壤含水量显著低于对照处理($P<0.05$),短期降水减少导致0~10 cm和10~20 cm土层含水量分别下降了8.34%和10.65%,遮雨处理同样降低了SOC、全氮及pH值,但差异不显著($P>0.05$)。在相同水分处理条件下,不同土层之间也存在差异。10~20 cm土层含水量及全磷含量略高于0~10 cm土层,而0~10 cm土层的pH值、SOC、全氮含量均高于10~20 cm土层,但仅有SOC、全氮含量差异显著($P<0.05$)。

表2 不同土层深度降水处理对土壤理化性质的影响

Tab. 2 Effects of precipitation treatment at different soil depths on soil physical and chemical properties

| 土壤理化性质 Physical and chemical properties of soil | 0 ~ 10 cm | | 10 ~ 20 cm | |
|---|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| | 对照 Compare | 遮雨 Shelter from rain | 对照 Compare | 遮雨 Shelter from rain |
| 土壤含水量/% Soil moisture | 24.23±0.45Aa | 22.21±0.42Ba | 25.27±0.39Aa | 22.58±0.36Ba |
| pH | 4.70±0.05Aa | 4.63±0.06Aa | 4.67±0.07Aa | 4.61±0.05Aa |
| 土壤有机碳/(g·kg ⁻¹) Soil organic carbon | 15.48±0.44Aa | 14.20±0.62Aa | 11.60±0.15Ab | 11.39±0.31Ab |
| 土壤全氮/(g·kg ⁻¹) Soil total nitrogen | 1.51±0.05Aa | 1.41±0.08Aa | 1.28±0.07Ab | 1.20±0.05Ab |
| 土壤全磷/(g·kg ⁻¹) Soil total phosphorus | 0.28±0.02Aa | 0.26±0.02Aa | 0.28±0.02Aa | 0.29±0.02Aa |

2.2 不同降水条件下土壤有机碳矿化动态变化

2.2.1 土壤有机碳矿化速率及SOC累积矿化量
不同土层及不同降水条件下土壤SOC矿化速率随培养时间的动态变化如图1所示。研究表明,不同土层土壤SOC矿化速率在不同降水条件下具有相似的变化规律。在土壤培养初期,土壤SOC矿化速率快速下降,随着培养时间的延长,其波动幅度渐小,最后慢慢趋于平稳。

双因素方差分析(表3)表明,不同降水处理及

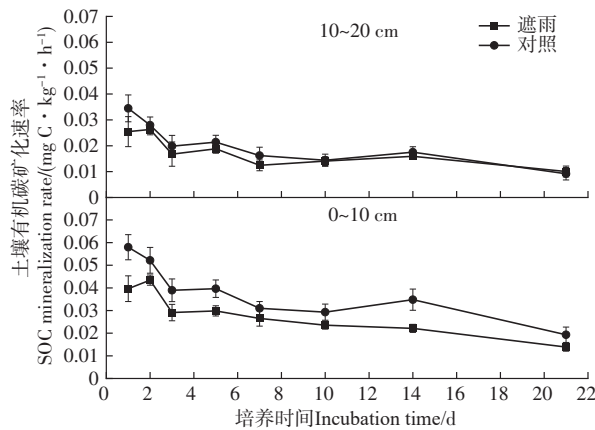


图1 不同降水处理不同土层土壤有机碳矿化速率及有机碳累积矿化量差异

Fig. 1 Differences in soil organic carbon mineralization rate and cumulative organic carbon mineralization in different soil horizons with different precipitation treatments

表3 降水处理和土层深度对SOC累积矿化量及SOC矿化率的双因素方差分析

Tab. 3 Two-way ANOVA of precipitation treatment and soil depth on cumulative SOC mineralization rate and SOC mineralization rate

| 影响因素 Influence factor | SOC 累积排放量 Cumulative SOC emissions | | SOC 矿化率 SOC mineralization rate | |
|--|---------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| | F | P | F | P |
| 降水处理(A) Precipitation treatment (A) | 9.289 | 0.006 | 6.515 | 0.019 |
| 土层深度(B) Soil depths (B) | 52.842 | <0.01 | 23.989 | <0.01 |
| A×B | 4.081 | 0.057 | 1.856 | 0.188 |

2.2.2 土壤有机碳矿化率及微生物代谢熵 土壤有机碳矿化率(CME)为培养周期内SOC累积矿化量与SOC含量的比值,能够有效反映土壤有机碳矿化的强度。从图2可知,不同降水处理及土层深度的CME与SOC累积矿化量的变化规律相似。短

期降水减少导致CME下降,0~10 cm土层中遮雨处理比对照显著下降了19%($P<0.01$),而同一水分处理不同土层间的CME差异也较为显著($P<0.01$),对照处理中,0~10 cm土层显著高于10~20 cm土层

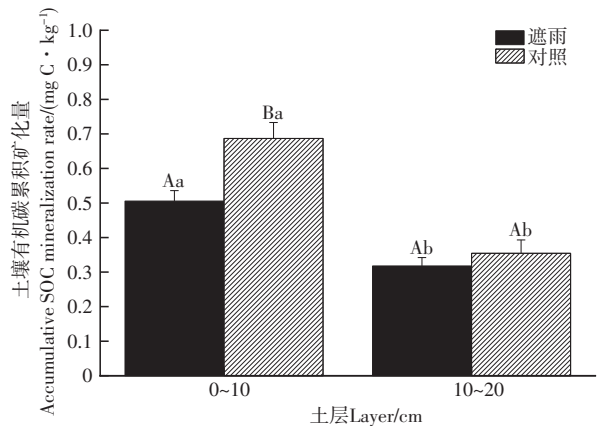


图2 不同降水处理不同土层土壤有机碳矿化率差异
Fig. 2 Differences in organic carbon mineralization rates of soils in different soil layers with different precipitation treatments

期降水减少导致CME下降,0~10 cm土层中遮雨处理比对照显著下降了19%($P<0.01$),而同一水分处理不同土层间的CME差异也较为显著($P<0.01$),对照处理中,0~10 cm土层显著高于10~20 cm土层

45%;遮雨处理中,0~10 cm 土层显著高于10~20 cm 土层28%,这也表明表层土的有机碳矿化强度显著高于亚表层土,不利于碳储存。

微生物代谢熵($q\text{CO}_2$)为培养周期内 SOC 矿化速率与 MBC 含量的比值,可有效反映土壤微生物对碳源利用效率的程度。不同土层遮雨处理均降低了 $q\text{CO}_2$ (图3),且这种差异在0~10 cm 土层中更为显著($P<0.01$),表明短期降水减少导致微生物分解单位质量碳释放的 CO_2 更少。同一降水条件下,0~10 cm 土层的 $q\text{CO}_2$ 也均高于10~20 cm 土层,但不同土层间的 $q\text{CO}_2$ 无显著差异($P>0.05$)。总体来看, $q\text{CO}_2$ 在不同水分及土层间的变化趋势与土壤 SOC 累积矿化量及 CME 相似。

2.3 不同降水条件下土壤有机碳及其碳组分变化

降水处理中,遮雨处理降低了 SOC 含量,但并不显著($P>0.05$),而在同一降水处理中,0~10 cm 土层的 SOC 含量均高于10~20 cm 土层($P<0.01$)。土壤活性有机碳组分在不同降水处理及不同土层中的变化趋势与 SOC 相似,短期降水减少导致各土层 EOC、MBC 及 DOC 的含量降低(除0~10 cm 土层 DOC 含量外),但这种变化仅在10~20 cm 土层的

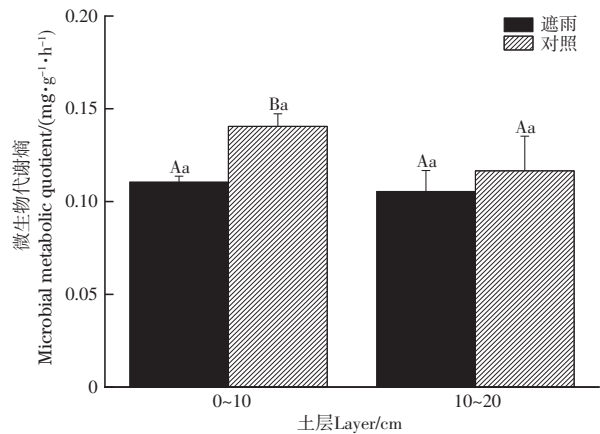


图3 不同降水处理不同土层土壤微生物代谢熵差异

Fig. 3 Differences in entropy of soil microbial metabolism in different soil layers with different precipitation treatments

EOC 含量上表现得更为显著($P<0.05$)。在相同水分条件下的不同土层中,0~10 cm 土层的 EOC、MBC 含量均显著高于10~20 cm 土层($P<0.01$)。短期降水减少同样降低了0~10 cm 土层中惰性有机碳 NEOC 的含量,而10~20 cm 土层中对照与遮雨处理的 NEOC 含量无差别,0~10 cm 土层的 NEOC 含量显著高于10~20 cm 土层($P<0.01$)。总体来看,不同降水处理下 SOC 及其碳组分无显著差异,

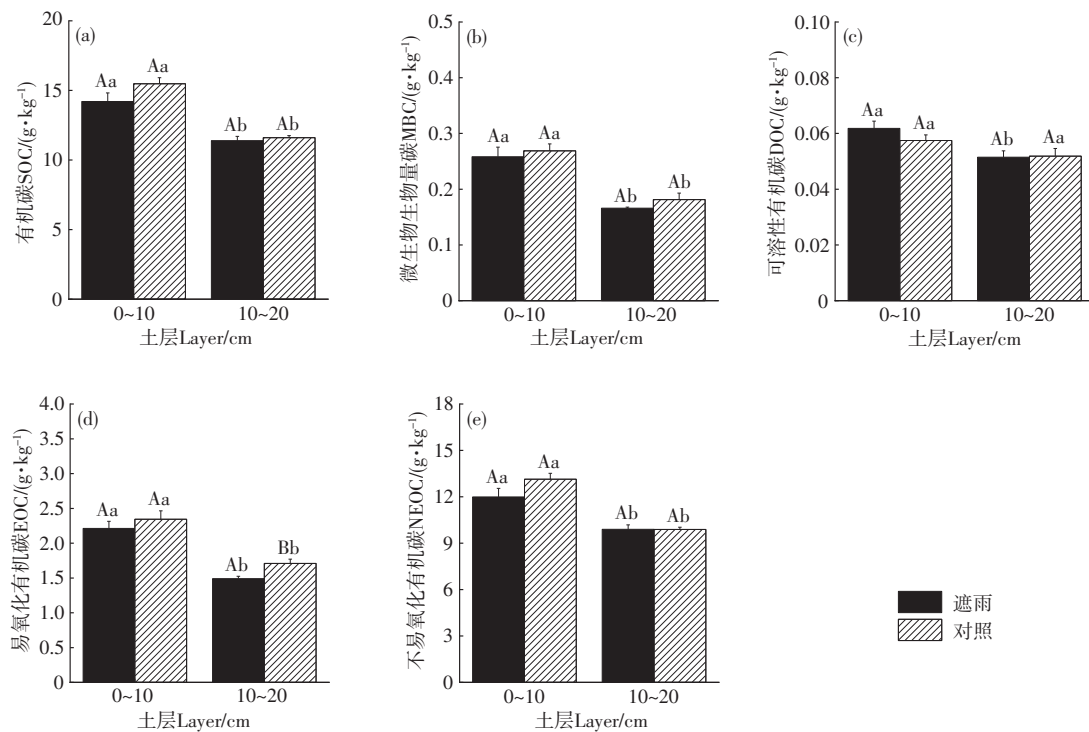


图4 不同降水处理不同土层土壤有机碳及有机碳组分差异

Fig. 4 Differences in soil organic carbon and organic carbon fractions in different soil horizons with different precipitation treatments

而同一降水处理不同土层对 SOC 及其碳组分的影响较为显著。

2.4 土壤有机碳矿化与有机碳组分及其他理化性质的关系

从相关分析的结果(图5)来看,土壤 SOC 累积

矿化量及 CME 与土壤 SOC、TN 呈极显著正相关 ($P<0.01$),还与土壤有机碳组分 EOC、MBC、NEOC 呈极显著正相关 ($P<0.01$),而 qCO_2 也与土壤 SOC 累积碳矿化量及 CME 三者之间均存在显著正相关关系 ($P<0.05$)。

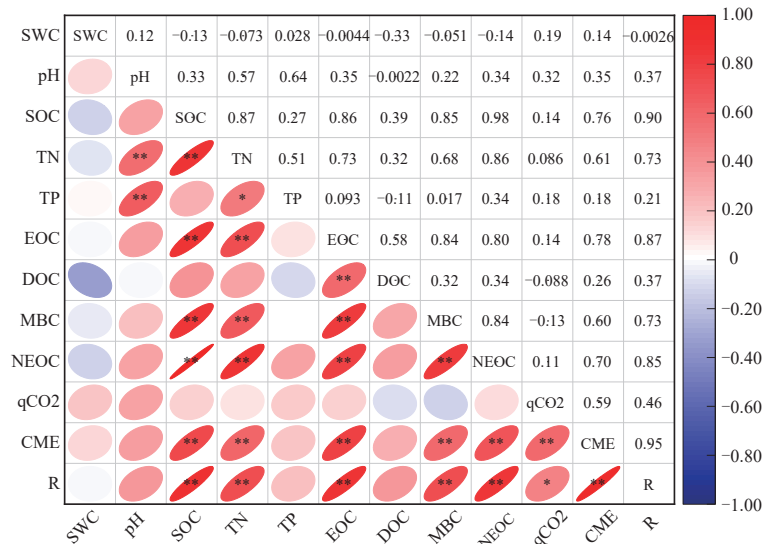


图5 土壤累积碳矿化量与有机碳组分等土壤因子的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of soil factors including cumulative carbon mineralization and organic carbon fractions in soil 红色和蓝色分别代表正相关和负相关,*表示显著相关 ($P<0.05$),**表示极显著相关 ($P<0.01$);CME为有机碳矿化率,R为有机碳累积矿化量。

Red represents positive correlation, blue represents negative correlation, *indicates significant correlation ($P<0.05$), **indicates highly significant correlation ($P<0.01$); CME is organic carbon mineralization rate, R is the cumulative mineralization of organic carbon.

3 讨论

3.1 短期降水减少对不同土层深度土壤有机碳矿化的影响 以往研究已表明,土壤水分过低会抑制SOC矿化^[20-21],本研究中,降水减少同样降低了不同土层土壤SOC矿化速率及SOC累积矿化量,0~10 cm土层中遮雨处理更是显著抑制了CO₂排放,而这种变化可能与土壤水分减少所引起的基质供应受限及微生物活性降低有关^[22]。一项在亚热带常绿林中进行的野外控水实验表明,干旱处理导致活性有机碳EOC、MBC降低,并进一步抑制了微生物活性,从而导致CO₂排放量显著降低^[23]。MBC、EOC是微生物所能利用的有效基质,也是SOC中最不稳定的部分,很容易被土壤微生物分解^[24],而本研究0~10 cm土层中,遮雨处理组同样降低了EOC、MBC含量,相关分析中土壤SOC累积矿化量与EOC、MBC呈极显著正相关,这也表明土壤水分的降低可能会通过影响基质供应量进而影

响微生物的代谢^[25],从而对有机碳的矿化造成影响。 qCO_2 是土壤微生物代谢活动的关键指标,也是估量微生物活性和底物质量的敏感指标^[26-27],降水减少同样导致0~10 cm土层 qCO_2 显著降低,这也表明水分的减少降低了土壤微生物的代谢活动,促使微生物在分解相同质量的有机碳时,释放的CO₂更少,这可以在一定程度上减少CO₂的排放,而 qCO_2 的降低也导致0~10 cm土层遮雨处理中的SOC矿化率显著降低,相关分析中土壤SOC累积矿化量、矿化率及 qCO_2 三者之间的显著正相关关系也证实了这一点。

相比0~10 cm土层,不同水分处理对10~20 cm土层SOC累积矿化量的影响并不显著,这可能与10~20 cm土层较低的基质供应(活性有机碳)及并不显著的 qCO_2 有关。刘慕瑛^[28]在研究短期降水变化对南亚热带季风常绿阔叶林有机碳矿化的影响时也发现,土壤水分减少对10~20 cm土层SOC累积矿化量的影响并不显著,其原因可能

与土壤水分对SOC矿化存在阈值有关,只有当水分变化超过一定的阈值时才能导致土壤微生物代谢活性发生变化,从而对土壤SOC矿化造成显著影响。除此之外,10~20 cm土层的水分渗透性相比0~10 cm土层可能较弱,而野外短期降水控制实验可能还不足以对10~20 cm土层SOC的矿化造成显著影响。这也表明相比亚表层土,表层土可能对短期降水减少条件下土壤SOC矿化的响应更敏感。

同一降水处理中,0~10 cm土层的SOC累积矿化量及CME均显著高于10~20 cm土层,不同土层间的基质供应差异可能是促使这一结果的主要原因^[29]。Fang等^[30]研究发现,植被恢复显著增加了土壤SOC、TN及活性有机碳含量,从而加速了SOC的矿化,相关研究也表明较高的土壤SOC及土壤养分含量通常会导致较高的SOC矿化量^[31-32],本研究中,0~10 cm土层SOC、TN、EOC、MBC含量均显著高于10~20 cm土层,而相关分析中SOC累积矿化量也均与以上土壤指标呈极显著正相关。除此之外,0~10 cm土层NEOC含量也显著高于10~20 cm土层,NEOC属于惰性有机碳,虽不易被微生物所分解,但其在SOC中的占比较大,随着土壤培养时间的延长,较易被微生物所能分解的活性有机碳逐渐减少,而此时惰性有机碳NEOC便成为了微生物所能利用的碳源,相关分析中NEOC与土壤SOC累积矿化量及矿化率之间极显著的正相关关系也表明了这点。由此可见,土壤有机碳、全氮及有机碳组分含量的变化可能是影响不同土层深度SOC矿化差异的主要原因。

3.2 短期降水减少及土层深度对土壤有机碳及其碳组分的影响 本研究中,短期降水减少导致不同土层SOC及其碳组分含量降低,但仅对亚表层EOC含量影响显著,相关分析中也并没有观察到土壤水分与SOC及其碳组分之间的显著相关性,这可能与旱季表层土壤水分的快速蒸发有关^[33],而野外降水操纵实验持续时间的长短可能也会极大地影响生态系统功能和过程的响应^[34]。研究表明,活性有机碳组分含量主要取决于SOC的含量^[35],降水减少降低了不同土层活性有机碳EOC、MBC的含量,0~10 cm土层惰性有机碳NEOC含量也随着水分的减少而下降,这些碳组分的变化趋势与SOC相似,且与SOC具有良好的正相关关系,这也表明碳组分的浓度降低主要跟降水量减

少导致的植物碳输入量减少有关,这与Chen等^[36]在研究降水变化对中国南方3个亚热带森林土壤有机碳组分的影响时的结果一致,但一项在美国东南部进行的田间降水试验却表明干旱处理会导致土壤EOC、MBC含量增加,这可能与微生物对不同生态系统水分胁迫的耐受性有关^[37]。与其他碳组分变化不同的是,0~10 cm土层中遮雨处理增加了DOC含量,但影响并不显著,这种变化可能与潮湿热带森林在经过短期降水隔离后,水分的减少使土壤通气性得到改善有关^[38]。本研究中,0~10 cm土层中的SOC、EOC、MBC、NEOC含量均显著高于10~20 cm土层,旱季水分减少可能会抑制植物生长,加速地表更多枯枝落叶等凋落物和根系的输入,从而提高表层土的碳输入,这可能是促使SOC及其碳组分含量增加的原因之一^[39];此外,在碳源较为丰富的0~10 cm土层中,通过径流造成的土壤碳损失也可能较低^[40]。这两个过程可能是造成0~10 cm土层SOC及其碳组分含量显著高于10~20 cm土层的原因。

本研究中,短期降水减少显著降低了0~10 cm土层SOC累积矿化量及矿化率,不同降水条件下的这种SOC矿化差异主要与有机碳组分含量的高低及 qCO_2 的差异有关。降水处理显著影响了不同土层SOC矿化的变化趋势,0~10 cm土层SOC累积矿化量及矿化率均显著高于10~20 cm土层,这主要归因于0~10 cm土层较高的土壤养分(SOC、TN)及有机碳组分含量。此外,不同降水处理对有机碳组分及10~20 cm土层有机碳矿化并没有显著影响,这可能主要与野外控水实验的周期短有关。这项研究表明,不同降水条件下土壤SOC矿化主要受到土壤基质可用性和微生物代谢活性的影响。本研究主要关注旱季发生短期降水减少后所引起的土壤水分减少是否会引起热带地区土壤有机碳组分及有机碳矿化的变化,而关于降水量减少的多少所引起的土壤水分减少对土壤有机碳矿化及有机碳组分的影响还需进一步探究。

参考文献:

- [1] UKKOLA A M, DE KAUWE M G, RODERICK M L, et al. Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(11): e87820G.
- [2] PIERRE F, MICHAEL O, JONES MATTHEW W, et al.

- Global carbon budget 2020 [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3269–3340.
- [3] QU W, HAN G, WANG J, et al. Short-term effects of soil moisture on soil organic carbon decomposition in a coastal wetland of the Yellow River Delta [J]. *Hydrobiologia*, 2021, 848(14): 3259–3271.
- [4] LIU L, WANG X, LAJEUNESSE M J, et al. A cross-biome synthesis of soil respiration and its determinants under simulated precipitation changes [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(4): 1394–1405.
- [5] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27(1): 38–42.
- [6] DAS S, RICHARDS B K, HANLEY K L, et al. Lower mineralizability of soil carbon with higher legacy soil moisture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 130: 94–104.
- [7] 陈小梅, 刘菊秀, 邓琦, 等. 降水变率对森林土壤有机碳组分与分布格局的影响 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1210–1216.
- [8] DONG L, FAN J, LI J, et al. Forests have a higher soil C sequestration benefit due to lower C mineralization efficiency: Evidence from the central loess plateau case [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 339: 108144.
- [9] MARENGO J, ESPINOZA J. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(3): 1033–1055.
- [10] 李广洋, 寇卫利, 陈帮乾, 等. 近30年海南岛橡胶林时空变化分析 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(1): 189–198.
- [11] TAN Z H, ZHANG Y P, SONG Q H, et al. Rubber plantations act as water pumps in tropical China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(24): 1–3.
- [12] 林业清, 王安伟, 苏攀, 等. 海南西部地区土壤养分分布特征: 以白沙黎族自治县为例 [J]. *中国热带农业*, 2017(1): 32–35.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 285–292.
- [14] BLAIR G J, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459–1466.
- [15] EDWARDS K A, MCCULLOCH J, PETER KERSHAW G, et al. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2843–2851.
- [16] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703–707.
- [17] HU R, HATANO R, KUSA K, et al. Soil respiration and net ecosystem production in an onion field in Central Hokkaido, Japan [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(1): 27–33.
- [18] CHENG H, ZHOU X, DONG R, et al. Priming of soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in response to vegetation restoration in a Karst area of Southwest China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 851(Pt 2): 158400.
- [19] HUANG J, LIN T C, XIONG D, et al. Organic carbon mineralization in soils of a natural forest and a forest plantation of southeastern China [J]. *Geoderma*, 2019, 344: 119–126.
- [20] LEGESSE T G, QU L, DONG G, et al. Extreme wet precipitation and mowing stimulate soil respiration in the Eurasian meadow steppe [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158130.
- [21] DENG Q, ZHANG D, HAN X, et al. Changing rainfall frequency rather than drought rapidly alters annual soil respiration in a tropical forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 121: 8–15.
- [22] MANZONI S, SCHAEFFER S M, KATUL G, et al. A theoretical analysis of microbial eco-physiological and diffusion limitations to carbon cycling in drying soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 73: 69–83.
- [23] BU X, GU X, ZHOU X, et al. Extreme drought slightly decreased soil labile organic C and N contents and altered microbial community structure in a subtropical evergreen forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 18–27.
- [24] XIAO Y, HUANG Z, LING Y, et al. Effects of forest vegetation restoration on soil organic carbon and its labile fractions in the Danxia landform of China [J]. *Sustainability*, 2022, 14(19): 12283.
- [25] ZHOU W, HUI D, SHEN W. Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration: a laboratory incubation study [J]. *PLoS One*, 2014, 9(3): e92531.
- [26] WARDLE D A, GHANI A. A critique of the microbial metabolic quotient (qCO_2) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(12): 1601–1610.
- [27] MORALES-LONDOÑO D M, MEYER E, KUNZE A, et al. Are microbial activity and arbuscular mycorrhizal fungal community influenced by regeneration stages? A case study in Southern Brazil coastal Atlantic Rain Forest [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 138: 94–98.
- [28] 刘慕瑛, 陈小梅, 吴华清, 等. 短期降水变化对南亚热带季风林SOC矿化的影响 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(9): 1759–1767.
- [29] 王佳盟, 刘伟, 刘志伟, 等. 生物质炭施用对不同深度稻田土壤有机碳矿化的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(9): 2081–2088.
- [30] FANG X, ZHU Y L, LIU J D, et al. Effects of moisture and temperature on soil organic carbon decomposition along a vegetation restoration gradient of subtropical China [J]. *Forests*, 2022, 13(4): 578.
- [31] ZHANG K, LI X, CHENG X, et al. Changes in soil prop-

- erties rather than functional gene abundance control carbon and nitrogen mineralization rates during long-term natural revegetation [J]. *Plant and Soil*, 2019, 443(1/2): 293–306.
- [32] AUWAL M, SINGH B P, CHEN Z, et al. Nutrients addition regulates temperature sensitivity of maize straw mineralization [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(8): 2778–2790.
- [33] CALDWELL M M, DAWSON T E, RICHARDS J H. Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants [J]. *Oecologia*, 1998, 113(2): 151–161.
- [34] WILCOX K R, SHI Z, GHERARDI L A, et al. Asymmetric responses of primary productivity to precipitation extremes: a synthesis of grassland precipitation manipulation experiments [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4376–4385.
- [35] SPOHN M, BABKA B, GIANI L. Changes in soil organic matter quality during sea-influenced marsh soil development at the North Sea coast [J]. *CATENA*, 2013, 107: 110–117.
- [36] CHEN X, ZHANG D, LIANG G, et al. Effects of precipitation on soil organic carbon fractions in three subtropical forests in Southern China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2016, 9(1): 10–19.
- [37] SINGH S, MAYES M A, SHEKOOFA A, et al. Soil organic carbon cycling in response to simulated soil moisture variation under field conditions [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 10841.
- [38] DOMÍNGUEZ M T, HOLTHOF E, SMITH A R, et al. Contrasting response of summer soil respiration and enzyme activities to long-term warming and drought in a wet shrubland (NE Wales, UK) [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 110: 151–155.
- [39] CHEN X, DENG Q, LIN G, et al. Changing rainfall frequency affects soil organic carbon concentrations by altering non-labile soil organic carbon concentrations in a tropical monsoon forest [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 762–769.
- [40] POLYAKOV V, LAL R. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion [J]. *Environment International*, 2004, 30(4): 547–556.

Effects of short-term precipitation reduction on soil organic carbon mineralization and organic carbon fractions in Hainan rubber forests

SUN Yujuan, ZHONG Lishuang, YANG Xiaobo, ZHANG Xiang
(College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228)

Abstract: In order to investigate the effects of short-term precipitation reduction on the changes of organic carbon mineralization rate and its carbon fractions in different soil layers, parameters such as soil organic carbon mineralization rate and organic carbon fractions under different precipitation conditions were determined by building a field isolated penetrating rain control platform and combining with indoor constant temperature incubation experiments using a typical plantation type of rubber forest soils in Hainan as the research object. The results showed that the short-term precipitation decreased the cumulative mineralization of SOC, the mineralization rate and the microbial metabolic entropy ($q\text{CO}_2$) in the soil layer from 0 to 10 cm, and the contents of easily oxidizable organic carbon (EOC), microbial biomass carbon (MBC) and inert organic carbon (NEOC) decreased with the decrease of the soil water content, but the effect was only significant on the EOC in the soil layer from 0 to 10 cm. Correlation analysis showed that the cumulative mineralization of soil SOC and the mineralization rate of SOC were both significantly and positively correlated with soil carbon and nitrogen contents (SOC, TN), the contents of each carbon fraction (EOC, MBC, NEOC), and $q\text{CO}_2$. In conclusion, short-term precipitation reduction inhibited the mineralization of SOC in rubber forest soils, and this change may be closely related to the effectiveness of soil substrate supply and changes in microbial metabolism under different moisture conditions.

Keywords: Rubber forest; Soil water content; Soil organic carbon fraction; Microbial metabolic entropy