

西双版纳热带森林恢复过程中土壤有机碳矿化速率的时空变化

王 平,王邵军*,曹乾斌,左倩倩,赵 爽,杨 波

(西南林业大学 生态与环境学院,云南 昆明 650224)

摘 要:为探究热带次生森林恢复对土壤有机碳矿化的影响,以西双版纳白背桐(恢复初期)和高檐蒲桃(恢复后期)次生热带森林群落为对象,通过室内需氧培养法研究热带森林土壤有机碳矿化速率的时空变化,并采用相关性和主成分分析方法揭示土壤微生物量碳及理化性质对有机碳矿化的影响特征。结果表明,随着次生热带森林的恢复,恢复后期的土壤有机碳矿化速率($4.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)显著高于恢复初期($3.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$);土壤有机碳矿化速率均呈单峰型季节变化,6月最高($4.78\sim5.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),且随土层加深而降低,其中0~5 cm土层矿化速率是10~15 cm的1.8~1.9倍;高檐蒲桃群落土壤有机质、易氧化碳、微生物量碳、全N和含水量相较于白背桐群落分别增加了11.3%、30.8%、25.7%、14.3%和23.5%;群落土壤有机碳矿化速率与微生物量碳、有机质、易氧化碳、全N和铵态N呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)正相关,其中土壤有机质、微生物量碳和易氧化碳是有机碳矿化的主控因子。西双版纳热带次生森林恢复主要通过改变土壤有机质积累及活性有机碳库组分(如易氧化碳与微生物量碳)来调控土壤有机碳的矿化动态。

关键词:热带次生森林;森林恢复;有机碳矿化;微生物量碳

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0022-07

Spatiotemporal Dynamics of Soil Carbon Mineralization Rates during the Restoration of Xishuangbanna Tropical Forests

WANG Ping,WANG Shao-jun*,CAO Gan-bin,ZUO Qian-qian,ZHAO Shuang,YANG Bo
(College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: This study aimed to explore the effect of tropical secondary forest restoration on soil organic carbon (SOC) mineralization. An indoor aerobic culture method was applied to explore the spatiotemporal changes in SOC mineralization rates in *Mallotus paniculatus* (primary stage) and *Syzygium oblatum* (later stage) communities during the restoration of Xishuangbanna tropical forests. The correlation and principal component analysis were also used to reveal the effect of soil microbial carbon and physicochemical properties on SOC mineralization. The results showed that SOC mineralization was higher in later restoration stage ($4.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) than in early stage ($3.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$). The SOC mineralization rates in *M. paniculatus* and *S. oblatum* communities showed unimodal seasonal changes, with the maximum value observed in June ($4.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ and $5.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively). The rates of SOC mineralization decreased along soil profile, and they were 1.8–1.9 times in 0–5 cm layer than in 10–15 cm layer. Soil organic matter, readily oxidized carbon, microbial carbon, total nitrogen, and water content increased by 11.3%, 30.8%, 25.7%, 14.3%, and 23.5%, respectively, in *S. oblatum* community

收稿日期:2020-07-02 修回日期:2020-12-21
基金项目:国家自然科学基金(32060281,31660191);国家林业局“948”项目(2015-4-39);云南省研究生导师团队建设项目和云南省高校优势特色重大学科(05000511311)。
作者简介:王 平。研究方向:生态学。E-mail:pingwang2009@126.com
*通信作者:王邵军,博士,教授。研究方向:土壤生态学。E-mail:shaojunwang2009@163.com

compared to *M. paniculatus* community ($P < 0.05$). The SOC mineralization rates were significantly correlated with soil microbial carbon, organic matter, easily oxidation carbon, total nitrogen, and ammonium nitrogen ($P < 0.05$ or 0.01). The principal component analysis indicated that soil organic matter, microbial carbon, and readily oxidized carbon were the main controlling factors for SOC mineralization. Therefore, we concluded that tropical forest restoration could regulate spatiotemporal dynamics of SOC mineralization, via mediating the accumulation of soil organic matter and the allocation of active organic carbon pool (e.g., microbial and easily oxidation carbon) in tropical Xishuangbanna.

Key words: tropical secondary forest; forest restoration; organic carbon mineralization; microbial carbon

近年来,全球变暖导致冰川融化以及海平面上升已成为人类所面临的最严峻生态环境问题, CO_2 排放剧增导致的温室效应越来越受到全球的广泛关注^[1]。土壤是 CO_2 排放的一个重要来源,全球大约20%的 CO_2 释放来源于土壤碳素^[2]。据统计,大约有1 500 Pg碳以土壤有机碳的形式存在于全球陆地生态系统中^[3],土壤有机碳库是全球植被碳库的2~3倍、大气碳库的3倍^[4-5]。土壤碳素主要通过土壤有机碳的矿化作用以 CO_2 的形式进入大气圈^[6]。因此,研究土壤有机碳矿化对于理解全球气候变化及全球碳平衡具有重要的科学意义。

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)的矿化主要是一个由微生物分解和利用土壤活性有机碳并释放 CO_2 的过程。SOC矿化是森林土壤碳循环的一个重要环节,在森林生态系统碳循环中具有核心地位与主导作用^[7]。森林SOC矿化作为一个重要的地下生态学过程,主要由森林类型、土壤有机碳库组成及含量、土壤微生物与动物群落组成、水热条件以及土壤理化性质等诸多生物与非生物因素所调控^[8]。目前,国内外关于森林SOC矿化的研究,主要集中在东北寒温带、西北高原温带及亚热带森林地区^[9-11],对热带森林SOC矿化时空动态特征的研究,却十分缺乏,严重制约人们关于热带森林SOC矿化的特征、过程及影响机制的认识。

热带森林物种丰富、结构复杂,具有最大的净初级生产力和固碳能力,在生物多样性保护、维持全球碳循环和缓解全球变暖等方面起着重要的作用^[12-13]。西双版纳位于热带北缘,是我国热带雨林集中分布的重要区域^[14-15]。但由于刀耕火种等传统农业方式严重地破坏热带雨林,形成了大面积处于不同恢复阶段的次生热带森林,可能显著影响SOC的矿化过程。本研究选择处于恢复初期的白背桐与后期的高檐蒲桃热带森林群落为对象,揭示热带森林恢复过程中SOC矿化的时空变化特征,剖析热带森林恢复过程中温湿度、微生物及养分等土壤性质的改变对SOC时空动态的影响,从而探明西双版纳热带森林恢复对SOC的影响方向、强度、过程及机

制,旨在为正确评价热带森林恢复对土壤碳循环、全球碳循环及温室效应缓解的影响提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院西双版纳热带植物园($21^{\circ}55' \text{ N}$ 、 $101^{\circ}16' \text{ E}$),终年无霜,全年平均气温 21.5°C ,年平均降水量约1 537 mm。1 a中分干湿两季,雨季为5—10月,干季从11月至次年4月,雨季和干季的降水量为1 335 mm和202 mm,雨季降水量占全年降水量的86.8%。土壤类型属于白垩纪砂岩发育而成的砖红壤。

选择处于恢复初期的白背桐与后期的高檐蒲桃热带森林群落为样地^[15-16],2群落相距约800 m,具有类似的地貌、坡向和坡度等立地特征;群落起源类似,均源自原始热带森林经刀耕火种所形成的次生裸地。白背桐群落:海拔600 m,恢复年限约12 a,植被盖度约60%,表层枯枝落叶厚度为1~2 cm;优势树种为白背桐(*Mallotus paniculatus*),约占90%,其他植物包括:高檐蒲桃(*Syzygium oblatum*)、粉被金合欢(*Acacia pruinescens*)、野生风轮草(*Clinopodium chinensis*)、椴叶山麻秆(*Alchornea tiliifolia*)及丰花草(*Borreria stricta*)等。高檐蒲桃群落:海拔619 m,恢复年限约53 a,盖度95%左右,表层枯枝落叶6~7 cm;样地优势树种为高檐蒲桃,占75%,其他植物包括:黑风藤(*Fissistigma polyanthum*)、鸡嗉子榕(*Ficus semicordata*)、思茅崖豆(*Millettia leptobotrya*)、多型叉蕨(*Tectaria polymorpha*)、云南黄杞(*Engelhardia spicata*)及子分叉露兜(*Pandanus furcatus*)等。

1.2 土壤取样与测定

于2016年3、6、9月和12月,分别在白背桐群落和高檐蒲桃群落随机设置3个重复样地($40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$,相距200 m),按照五点采样法,在样地中心和中心到4个角的等距中心确定5个采样点,进行0~5、5~10 cm及10~15 cm分层采样,采样前小心去除表层枯枝落叶。将采集的土壤样品装入自封

袋,贴上标签,带回实验室进行相关的土壤理化性质测定。将白背桐和高檐蒲桃群落 0~5、5~10 cm 及 10~15 cm 的土壤分层混匀,再称取 3 个土层的土壤各 50 g 装入 1 L 的广口瓶中,重复 3 次,同时做对照试验。将浓度为 0.1 mol · L⁻¹ 的 NaOH 溶液放入广口瓶,密封,在恒温恒湿培养箱内培养 7 d,再取出碱液加入过量的 BaCl₂ 溶液,加入酚酞指示剂,用浓度为 0.05 mol · L⁻¹ 的 HCl 滴定,计算出 SOC 矿化速率。SOC 矿化速率的公式为:

$$\text{CO}_2/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}) = (V_0 - V) \times C \times 1/2 \times 44/(m \times (1 - w)) \times 1/t \tag{1}$$

式中, V_0 为滴定对照组消耗的盐酸体积/mL; V 为滴定实验组消耗的盐酸体积/mL; C 为滴定的盐酸浓度/(mol · L⁻¹); m 为土样的质量/g; w 为土壤水分质量分数/%; t 为培养天数/d。

土壤含水率的测定采用烘干称量法(105℃, 24 h);pH 值的测定采用电位法(水土比 2.5 : 1);土壤微生物生物量碳的测定采用液态氯仿熏蒸浸提—水浴法;土壤有机质的测定采用油浴加热—重铬酸钾氧化法;土壤易氧化碳的测定采用高锰酸钾氧化法;铵态 N 的测定采用 MgO 浸提扩散法;全 N 的测定采用扩散法;水解性 N 的测定采用碱解扩散法;硝态 N 的测定采用酚二磺酸比色法。

1.3 数据处理

将所测的土壤数据进行运算和统计,用 Excel 2003 做图分析。在 SPSS 25.0 中进行 SOC 矿化速率与土壤理化性质的相关性分析,并基于 Canoco 进行 SOC 矿化的主成分分析。

2 结果与分析

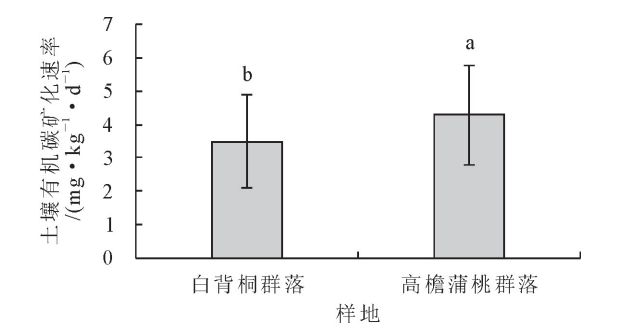
2.1 白背桐和高檐蒲桃热带森林群落土壤有机碳矿化均值比较

通过对 4 个月份 3 个土层所有土壤取样的矿化培养数据进行统计,结果表明,白背桐和高檐蒲桃热带森林群落 SOC 矿化速率的均值存在显著差异(图 1, $P < 0.05$)。其中,恢复后期的高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率(4.29 mg · kg⁻¹ · d⁻¹)显著高于恢复初期的白背桐群落(3.50 mg · kg⁻¹ · d⁻¹),恢复后期的 SOC 矿化速率是恢复前期的 1.22 倍。因此,热带森林次生恢复能够显著影响 SOC 矿化速率。

2.2 白背桐和高檐蒲桃热带森林土壤有机碳矿化时空特征的比较

通过对白背桐和高檐蒲桃热带森林 SOC 矿化速率的月份变化进行分析,发现 2 群落 SOC 矿化速率均随月份呈单峰型变化(图 2),SOC 矿化速率 3—6 月逐渐升高,再逐渐降低到 12 月,即 6 月 > 9 月

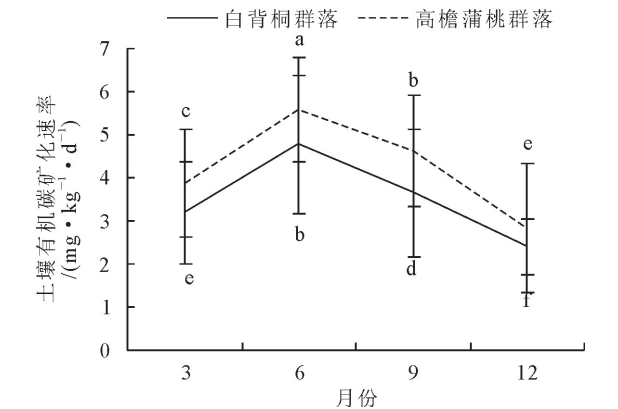
> 3 月 > 12 月。6 月 SOC 矿化速率最高,高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率(5.60 mg · kg⁻¹ · d⁻¹)显著高于白背桐群落(4.78 mg · kg⁻¹ · d⁻¹);12 月 SOC 矿化速率最低,高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率(2.82 mg · kg⁻¹ · d⁻¹)显著高于白背桐群落(2.40 mg · kg⁻¹ · d⁻¹)。



注:数据为 4 个月 3 个土层所有取样的 SOC 矿化速率平均值。不同字母表示 2 个次生热带森林群落 SOC 矿化率差异性显著 ($P < 0.05$)。

图 1 白背桐和高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率的均值比较

Fig. 1 Comparison of average SOC mineralization rates in *M. paniculatus* and *S. oblatum* communities



注:不同字母表示 2 种热带森林土壤有机碳矿化速率差异性显著 ($P < 0.05$)。

图 2 白背桐和高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率的月份变化

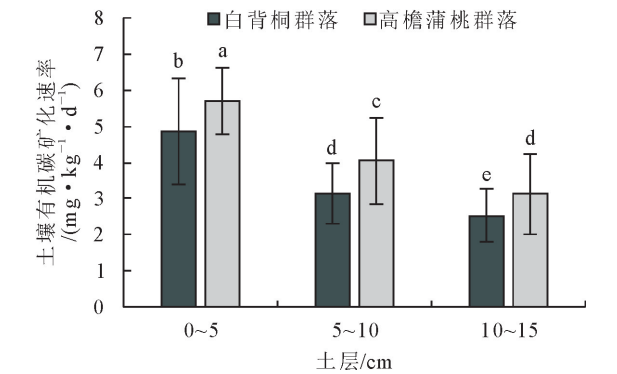
Fig. 2 Monthly variation of SOC mineralization rate in *M. paniculatus* and *S. oblatum* communities

对热带森林白背桐和高檐蒲桃群落不同土层(0~5、5~10、10~15 cm)SOC 矿化速率进行分析,结果表明 2 个样地 SOC 矿化速率均随土层的增加而呈现显著减小的趋势(图 3)。在相同土层,SOC 矿化速率均表现为高檐蒲桃群落高于白背桐群落,并且 2 个群落土层之间有显著差异。在 0~5 cm 土层中,高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率是白背桐群落的 1.17 倍;5~10 cm 土层,高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率是白背桐群落的 1.28 倍;10~15 cm 土层,高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率是白背桐群落的 1.23 倍。

2.3 白背桐和高檐蒲桃热带森林土壤理化性质的比较

对白背桐和高檐蒲桃热带森林土壤理化性质进

行测定(表 1),结果表明,随着热带森林群落的恢复,高檐蒲桃群落土壤有机质、微生物量碳、易氧化碳、全氮和含水量较白背桐群落增加了 11.3%、30.8%、25.7%、14.3%和 23.5%($P<0.05$)。



注:不同字母表示 2 种恢复阶段热带森林土壤有机碳矿化速率差异性显著($P<0.05$)。

图 3 白背桐和高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率的土层变化

Fig. 3 Profile variation of SOC mineralization rate in *M. paniculatus* and *S. oblatum* communities

表 1 白背桐和高檐蒲桃群落土壤理化性质的变化

Table 1 Changes of soil physicochemical properties in *M. paniculatus* and *S. oblatum* communities

土壤样地	白背桐群落	高檐蒲桃群落
有机质 SOM/(g · kg ⁻¹)	29.97±5.21b	33.36±7.37a
微生物量碳 MBC/(g · kg ⁻¹)	1.32±0.38b	1.66±0.63a
易氧化碳 EOC/(g · kg ⁻¹)	7.63±1.71b	9.98±2.00a
全氮 TN/(g · kg ⁻¹)	0.14±0.07b	0.16±0.05a
水解氮 HN/(mg · kg ⁻¹)	91.51±35.72a	99.24±33.84a
铵态氮 AN/(mg · kg ⁻¹)	6.69±2.02a	7.17±1.86a
硝态氮 NN/(mg · kg ⁻¹)	1.89±0.41a	1.99±0.65a
pH	3.72±0.28a	3.66±0.26a
含水量 SW/(g · kg ⁻¹)	116.52±41.66b	143.97±47.20a
容重 BD/(g · cm ⁻³)	1.37±0.13a	1.31±0.10a

注:不同小写字母表示 2 个样地之间显著差异($P<0.05$)。

2.4 土壤碳矿化速率与土壤理化性质的关系

对白背桐和高檐蒲桃热带森林群落 SOC 矿化速率与土壤理化性质进行相关性分析(表 2),发现 2 群落 SOC 矿化速率与土壤微生物量碳和易氧化碳呈极显著正相关($P<0.01$),与全氮和铵态氮呈显著正相关($P<0.05$),与 pH、容重、含水量、硝态氮和水解氮的相关性不显著($P>0.05$)。白背桐群落 SOC 矿化速率与有机质呈显著正相关($P<0.05$),而高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率与有机质呈极显著正相关($P<0.01$)。

经主成分分析,发现白背桐和高檐蒲桃群落第 1 坐标轴对 SOC 矿化速率的贡献率分别为 98.3%和 99.2%(图 4),第 2 坐标轴的贡献率为 1.2%和 0.5%。从图 4 中可以看出,土壤有机质、易氧化碳

和微生物量碳与 SOC 矿化速率的夹角最小,是其主控因子,而土壤全氮、水解氮、铵态氮、含水量和容重的贡献次之。

表 2 白背桐和高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率与理化性质的相关性

Table 2 Correlation between SOC mineralization rate and soil properties in *M. paniculatus* and *S. oblatum* communities

土壤性质	白背桐群落	高檐蒲桃群落
有机质	0.681*	0.894**
微生物量碳	0.847**	0.839**
易氧化碳	0.711**	0.880**
全氮	0.683*	0.598*
水解 N	0.245	0.414
铵态 N	0.598*	0.660*
硝态 N	0.216	0.029
pH	-0.571	-0.568
含水量	0.512	0.439
容重	0.373	0.104

注: ** 表示 $P<0.01$; * 表示 $P<0.05$ 。

3 结论与讨论

3.1 热带森林恢复对土壤有机矿化时空动态的影响

研究发现,热带森林群落的次生恢复对 SOC 矿化速率具有显著影响。恢复后期的高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率显著高于恢复初期的白背桐群落。这主要是由于 SOC 矿化易受植被类型、植被覆盖、地上/地下物质输入、土壤理化性质及土壤环境的影响^[17-18]。随着热带森林群落的恢复,植被覆盖度增加,森林群落组成、结构及多样性趋于复杂化,凋落物和根系生物量增加,微生物生长繁殖所需的底物数量增加,刺激土壤微生物的繁殖及活动^[19],从而对 SOC 矿化过程产生显著影响。

白背桐和高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率均随月份呈单峰型变化。6 月的 SOC 矿化速率最高,主要是由于该月气温较高、降雨量充足、土壤水热条件好。良好的水热条件对植物的生长发育有利,植被的根系呼吸旺盛,植物生长代谢产生的分泌物为微生物活动提供养料^[20-22];并且在高温高湿环境条件下,植被凋落物分解速度加快,进入土壤的养分增多^[23-24],从而导致 SOC 矿化速率的上升。12 月处于旱季,降水量减少,土壤中的水分不足,微生物的活性和数量受到限制,对凋落物的分解减弱,因此,该月的 SOC 矿化速率最低。但热带森林恢复对 SOC 矿化速率时间动态的影响存在样地差异性,高檐蒲桃群落不同月份 SOC 矿化速率均高于白背桐群落,其中高檐蒲桃群落 6 月 SOC 矿化速率是白背桐群落的 1.2 倍。

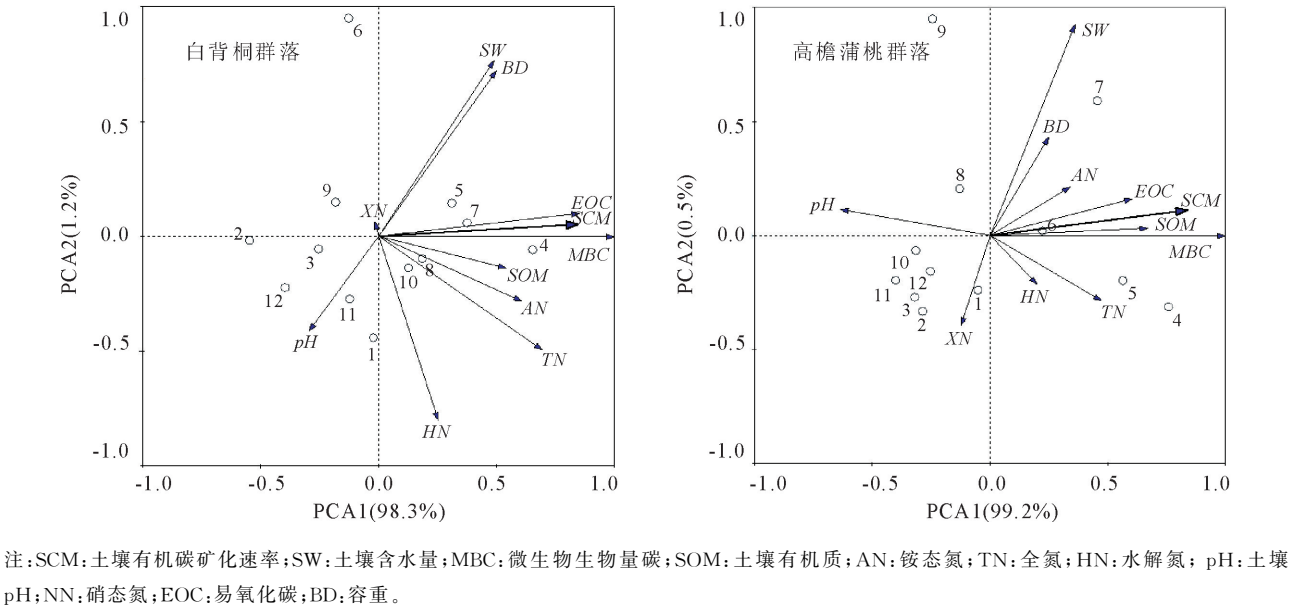


图 4 白背桐和高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率与土壤理化性质的主成分分析 (PCA)

Fig. 4 Principal component analysis (PCA) of SOC mineralization rate and soil properties in *M. paniculatus* and *S. oblatum* communities

2 种恢复阶段 SOC 矿化速率均表现随土层深度的加深而降低的趋势,且表层 SOC 矿化速率明显高于其他土层。这与陈仕奇等^[25]、周焱等^[26]、张玲等^[18]的研究结果相似,随着土层加深,SOC 矿化速率逐渐下降。这可能由于 SOC 矿化底物基质主要来源于凋落物和根系,凋落物分解产物和根系分泌物首先进入土壤表层,造成土壤表层 SOC 矿化底物基质含量较高^[27-28],为土壤酶和微生物的活动提供充足的物质和能量,导致 SOC 矿化速率增快;而深层土壤 SOC 矿化底物基质含量低,土壤微生物可利用基质减少,因此,SOC 矿化速率较小^[29-30]。但热带森林恢复对 SOC 矿化速率沿土层变化的影响同样存在样地差异性,高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率是白背桐群落的 1.2~1.3 倍。

3.2 土壤微生物与理化性质对有机碳矿化的影响

土壤微生物与理化性质是影响 SOC 矿化的重要因素^[31-35],随着热带森林的恢复,植被覆盖率、群落组成、凋落物的数量与质量、土壤微生物类群和数量、土壤环境及理化性质等随之发生变化,从而导致不同恢复阶段 SOC 矿化速率存在显著差异^[11]。

随着热带森林的恢复,恢复后期的高檐蒲桃群落土壤微生物量碳显著高于恢复初期的白背桐群落。恢复后期的森林结构复杂化,植物多样性增加,凋落物增加,这可能导致土壤有机质及易分解碳的增加,通过提高底物的可利用性而促进 SOC 矿化。枯落物中的易分解碳组分作为活性碳源被微生物优先利用,同化为土壤微生物量碳并储存于微生物体内^[36]。相关性分析发现 2 个群落土壤微生物量碳

与 SOC 矿化速率呈极显著正相关。何相宜等^[37]也发现天山云杉林 SOC 矿化速率与土壤微生物碳量存在显著相关。因此,土壤微生物性质(如微生物量碳)是导致白背桐与高檐蒲桃群落 SOC 矿化速率存在显著差异的重要原因。

土壤碳素及氮素作为 SOC 矿化的底物,其含量变化必将直接影响 SOC 矿化^[10,38]。土壤有机质及易氧化碳含量越高,微生物可利用的底物增多,从而促进了 SOC 的矿化。而土壤 N 是植物生长的重要营养来源,也是微生物活动的主要营养与能量来源之一,土壤 N 源在一定程度上能够促进微生物对 SOC 矿化。本研究,随着热带森林的恢复,恢复后期的高檐蒲桃群落土壤碳与 N 含量增加,微生物可利用底物增加,有利于 SOC 的微生物矿化。相关性分析表明,SOC 矿化速率与有机质和全氮呈显著正相关关系。这与前人的研究结果相似。王红等^[39]研究发现土壤有机质含量的增加显著提高了 SOC 矿化速率。另外,土壤氮含量的增加能够促进 SOC 矿化。张玲等^[17]对阔叶红松林不同演替系列 SOC 矿化进行研究,发现 SOC 矿化与土壤全氮呈显著正相关。因此,随着热带森林恢复演替的进行,土壤碳氮库组成改变及含量增加,能够显著促进热带森林土壤 SOC 的矿化。

参考文献:

[1] 张建勇. 浅析国有林业碳汇的作用[J]. 农业与技术,2018,38(4):188.
[2] BLAGODATSKY S, SMITH P. Soil physics meets soil biolo-

- gy: towards better mechanistic prediction of greenhouse gas e-missions from soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 47 (none): 78-92.
- [3] AMUNDSON R. The carbon budget in soils[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, 29: 535-562.
- [4] 贾宇平. 土壤碳库分布与储量研究进展[J]. 太原师范学院学报: 自然科学版, 2004, 3(4): 62-64.
- [5] 汪业勋, 赵士洞, 牛栋. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志, 1999, 18(5): 29-35.
- [6] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 贵州黄壤性水稻土不同粒径有机碳之间的矿化差异[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(14): 223-226.
- [7] GRAVE, ROBERTO ANDRÉ, NICOLOSO R D S, *et al.* Short-term carbon dioxide emission under contrasting soil disturbance levels and organic amendments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 184-192.
- [8] REY A, PETSİKOS C, JARVIS P G, *et al.* Effect of temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a Mediterranean oak forest soil under controlled and field conditions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 56(5): 589-599.
- [9] 高菲, 林维, 崔晓阳. 小兴安岭两种森林类型土壤有机碳矿化的季节动态[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 9-16.
- GAO F, LIN W, CUI X Y. Seasonal dynamics of soil organic carbon mineralization for two forest types in Xiaoxing' an Mountains China[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 9-16. (in Chinese)
- [10] HOPKINS D W, SPARROW A D, ELBERLING B, *et al.* Carbon, nitrogen and temperature controls on microbial activity in soils from an antarctic dry valley[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(10): 3130-3140.
- [11] 王丹, 吕瑜良, 徐丽, *et al.* 植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 420-428.
- [12] 臧润国, 张志东. 热带森林植物功能群及其动态研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 205-212.
- [13] 卜文圣. 海南岛热带天然林生物多样性与生态系统功能关系的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [14] CHEN D X, LI Y D, LIU H P, *et al.* Biomass and carbon dynamics of a tropical mountain rain forest in China[J]. *Science China: Life Sciences*, 2010(7): 50-62.
- [15] 王红, 王邵军, 李霁航. 西双版纳高檐蒲桃群落土壤呼吸的季节动态及主要影响因子分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(1): 111-116.
- WANG H, WANG S J, LI J H. Soil respiration seasonal dynamic and main factors affecting analysis of *Syzygium oblatum* community in Yunnan Xishuangbanna, China[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2018, 38(1): 111-116. (in Chinese)
- [16] 王邵军, 王红, 李霁航. 热带森林不同演替阶段蚂蚁巢穴的分布特征及其影响因素[J]. 生物多样性, 2016, 24(8): 916-921.
- WANG S J, WANG H, LI J H. Distribution characteristics of ant mounds and correlating factors across different succession stages of tropical forests in Xishuangbanna[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(8): 916-921. (in Chinese)
- [17] 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, *et al.* 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(5): 83-96.
- GU X, ZHANG S J, LIU Z D, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil organic carbon concentration and density in the mid-subtropical region of China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(5): 83-96. (in Chinese)
- [18] 张玲, 张东来, 毛子军. 中国温带阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化特征[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 85-93.
- ZHANG L, ZHANG D L, MAO Z J. Characteristic mineralization of soil organic carbon in different successional series of broadleaved Korean pine forests in the temperate zone in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 85-93. (in Chinese)
- [19] 辜翔. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳库积累及其稳定性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [20] AVILA J M, GALLARDO A, IBANEZ B, *et al.*, 2016. *Quercus suber* dieback alters soil respiration and nutrient availability in Mediterranean forests [J]. *Journal of Ecology*, 104(5): 1441-1452.
- [21] FANG X, ZHAO L, ZHOU G Y, *et al.* Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests [J]. *Plant and Soil*, 2015, 392(1/2): 139-153.
- [22] TAYLOR A J, LAI C T, HOPKINS F M, *et al.* Radiocarbon-based partitioning of soil respiration in an old-growth coniferous forest[J]. *Ecosystems*, 2015, 18(3): 459-470.
- [23] 杨开军, 熊莉, 杨万勤, 等. 林窗对川西亚高山云杉人工林土壤呼吸的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(3): 505-509.
- YANG K J, XIONG L, YANG W Q, *et al.* Effects of forest gap to soil respiration in a subalpine *Picea asperata* plantation of western Sichuan [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, 22(3): 505-509. (in Chinese)
- [24] 葛晓改, 周本智, 肖文发, 等. 生物炭输入对土壤碳排放的激发效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 339-345.
- GE X G, ZHOU B Z, XIAO W F, *et al.* Priming effect of biochar addition on soil carbon emission: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2): 339-345. (in Chinese)
- [25] 陈仕奇, 昌盛, 高明, 等. 缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 953-960.
- CHEN S Q, LÜ S, GAO M, *et al.* Characteristics of soil organic carbon and mineralization with different stands in Jinyun mountain [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 953-960. (in Chinese)
- [26] 周焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11): 1901-1907.
- ZHOU Y, XU X G, RUAN H H, *et al.* Mineralization rates of soil organic carbon along an elevation gradient in Wuyi Mountain of southeast China[J]. *Journal of Ecology*, 2008, 27(11): 1901-1907. (in Chinese)
- [27] 王飞, 马剑平, 马俊梅, 等. 民勤不同林龄胡杨根区土壤理化性质及相关性分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 23-28.
- WANG F, MA J P, MA J M, *et al.* Physicochemical properties and correlations of the soils in the puplus euphratica forests with different ages in Minqin[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(3): 23-28. (in Chinese)

[28] 马俊梅,马剑平,满多清,等. 石羊河下游天然胡杨林分布特征及土壤特性分析[J]. 西北林学院学报, 2020,35(2):15-23.
MA J M, MA J P, MAN D Q, *et al.* Distribution and soil characteristics of natural populus euphratica forests in the lower reaches of Shiyang River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020,35(2):15-23. (in Chinese)

[29] 杨开军,杨万勤,贺若阳, *et al.* 川西亚高山 3 种典型森林土壤碳矿化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017,23(5):83-88.
YANG K J, YANG W Q, HE R Y, *et al.* Soil organic carbon mineralization characteristics of three dominant subalpine forests in western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017,23(5):83-88. (in Chinese)

[30] 宋媛,赵溪竹,毛子军,等. 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性[J]. 生态学报, 2013,33(2):443-453.
SONG Y, ZHAO X Z, MAO Z J, *et al.* SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing'an Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(2):443-453. (in Chinese)

[31] 李顺姬,邱莉萍,张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2010,30(5):1217-1226.

[32] SCHIMEL W J P. Interactions between Carbon and Nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in Arctic tundra soils[J]. Ecosystems, 2003,6(2):129-143.

[33] 陈吉,赵炳梓,张佳宝,等. 长期施肥潮土在玉米季施肥初期的有机碳矿化过程研究[J]. 土壤, 2009,41(5):719-725.

[34] 黄耀,刘世梁,沈其荣, *et al.* 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002,13(6):709-714.

[35] 李忠佩,林心雄. 瘠薄红壤中有机物质的分解特征[J]. 生态学报, 2002,22(8):1224-1230.

[36] 何友军,王清奎,汪思龙,等. 杉木人工林土壤微生物生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系[J]. 应用生态学报, 2006,17(12):2292-2296.

[37] 何相宜,刘肖肖,戴伟. 天山云杉林土壤有机碳矿化特征[J]. 西北林学院学报, 2019,34(2):7-13.
HE X Y, LIU X X, DAI W. Mineralization features *Picea schrenkiana* forest soil[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019,34(2):7-13. (in Chinese)

[38] 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.

[39] 王红,范志平,邓东周,等. 不同环境因子对樟子松人工林土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008,27(9):1469-1475.
WANG H, FAN Z P, DENG D Z, *et al.* Effects of environmental factors on soil organic carbon mineralization in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation[J]. Journal of Ecology, 2008,27(9):1469-1475. (in Chinese)

(上接第 21 页)

[21] 尹亚丽,王玉琴,李世雄,等. 围封对退化高寒草甸土壤微生物群落多样性及土壤化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2019,30(1):127-136.
YIN Y L, WANG Y Q, LI S X, *et al.* Effects of enclosing on soil microbial community diversity and soil stoichiometric characteristics in a degraded alpine meadow[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(1):127-136. (in Chinese)

[22] 李海云,姚拓,马亚春,等. 祁连山中段退化高寒草地土壤细菌群落分布特征[J]. 草业学报, 2019,28(8):170-179.
LI H Y, YAO T, MA Y C, *et al.* Soil bacterial community changes across a degradation gradient in alpine meadow grasslands in the central Qilian Mountains[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019,28(8):170-179. (in Chinese)

[23] 卢慧,赵珩,盛玉钰,等. 基于高通量测序的两种高寒草甸土壤原核生物群落特征研究[J]. 生态学报, 2018,38(22):8080-8087.
LU H, ZHAO H, SHENG Y Y, *et al.* Soil prokaryotic community characteristics in two alpine meadow types based on high-throughput sequencing techniques [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(22):8080-8087. (in Chinese)

[24] 魏兴琥,杨萍,谢忠奎,等. 西藏那曲地区高山嵩草草地的分布与利用[J]. 草地学报, 2003,11(1):67-74.

[25] 陶磊,褚贵新,刘涛,等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014,34(21):6137-6146.

[26] 周丽甜,耿玉清,王玲,等. 人工油松林土壤线虫密度垂直分布及其影响因素[J]. 西北林学院学报, 2017,32(1):43-47.
ZHOU L T, GENG Y Q, WANG L, *et al.* Vertical distribution of soil nematodes density and the its driving factors in *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017,32(1):43-47. (in Chinese)

[27] 赵梦赛,栾亚宁,戴伟,等. 丝栗栲林土壤微生物 PLFA 群落结构的时空变化特征[J]. 西北林学院学报, 2019,34(6):16-21,73.
ZHAO M S, LUAN Y N, DAI W, *et al.* Spatial and temporal variation characteristics of soil microbial PLFA community in *Castanopsis fargesii* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019,34(6):16-21,73. (in Chinese)

[28] 吴纪华,宋慈玉,陈家宽. 食微线虫对植物生长及土壤养分循环的影响[J]. 生物多样性, 2007,15(2):124-133.
WU J H, SONG C Y, CHEN J K. Effect of microbivorous nematodes on plant growth and soil nutrient cycling: a review [J]. Biodiversity Science, 2007,15(2):124-133. (in Chinese)

[29] 杜晓芳,李英滨,刘芳,等. 土壤微食物网结构与生态功能[J]. 应用生态学报, 2018,29(2):403-411.
DU X F, LI Y B, LIU F, *et al.* Structure and ecological functions of soil micro-food web [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(2):403-411. (in Chinese)