

DOI: 10.5846/stxb201806021230

张哲, 王邵军, 李霁航, 曹润, 陈闽昆, 李少辉. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应. 生态学报, 2019, 39(17): - .

Zhang Z, Wang S J, Li J H, Cao R, Chen M K, Li S H. Response of soil readily oxidizable carbon to community succession of Xishuangbanna tropical forests. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应

张 哲¹, 王邵军^{1,2,*}, 李霁航¹, 曹 润¹, 陈闽昆¹, 李少辉¹

¹ 西南林业大学生态与水土保持学院, 昆明 650224

² 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 土壤易氧化有机碳 (Readily oxidizable carbon, ROC) 作为土壤中易被氧化且活性较高的有机碳, 能够敏感反映群落植被环境与土壤环境的早期变化。为探明土壤 ROC 时空变化对热带森林次生演替的响应, 本研究以西双版纳热带森林不同次生演替阶段 (白背桐群落、野芭蕉群落与崖豆藤群落) 为研究对象, 采用高锰酸钾氧化法测定并分析土壤 ROC 时空动态特征, 探究这些变化与土壤微生物量碳及理化性质之间的相互关系。结果表明: (1) 不同次生演替阶段热带森林土壤 ROC 含量存在显著差异, 其大小顺序为: 野芭蕉群落 (11.38 mg/g) > 崖豆藤群落 (10.5 mg/g) > 白背桐群落 (9.72 mg/g); (2) 不同次生演替阶段热带森林土壤 ROC 含量的月份变化趋势基本一致, 均表现为 6 月显著高于 12 月, 且各月份间差异显著; (3) 不同次生演替阶段热带森林土壤 ROC 含量随着土层深度增加而递减, 且不同土层间差异显著; (4) 土壤有机碳、微生物量碳、全氮、水解氮和铵态氮显著影响土壤 ROC 含量的时空变化, 而 pH 值与土壤 ROC 显著负相关。因此, 土壤 ROC 对西双版纳热带森林群落演替具有敏感的响应, 土壤总有机碳、微生物量碳、全氮、水解氮、铵态氮及 pH 是土壤 ROC 时空变化的主控因素。

关键词: 热带森林; 易氧化有机碳; 土壤理化性质; 次生演替

Response of soil readily oxidizable carbon to community succession of Xishuangbanna tropical forests

ZHANG Zhe¹, WANG Shaojun^{1,2,*}, LI Jihang¹, CAO Run¹, CHEN Minkun¹, LI Shaohui¹

¹ College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

² Joint center for sustainable forestry in southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Readily oxidizable carbon (ROC) is of the most easily oxidized and sensitive carbons in soil, and sensitively responds to early environment changes in plants and soils. This study aimed to understand the spatiotemporal dynamics response of soil ROC to secondary succession in tropical forests. The spatiotemporal variation in soil ROC was measured by potassium permanganate oxidation; the relationship of soil ROC to soil microbial carbon and physiochemical properties in three secondary succession stages (*Mallotus paniculatus*, *Musa acuminata*, and *Mellettia leptobotrya*) of Xishuangbanna tropical forests was also analyzed. The results were as follows: (1) Soil ROC varied significantly across the three succession stages ($P < 0.05$), in the order of *M. leptobotrya* > *M. acuminata* > *M. paniculatus*; (2) the ROC concentration had similar monthly variations in the three succession stages, with higher values observed in March and June, and lower values in September and December; (3) the ROC concentration significantly decreased down through the soil profile in the three

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31660191, 41461052); 国家林业局“948”项目 (2015-4-39); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2018Y129)

收稿日期: 2018-06-02; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shaojunwang2009@163.com

secondary succession stages. (4) The spatiotemporal variation in soil ROC was positively affected by the soil organic carbon, microbial carbon, total nitrogen, hydrolyzable nitrogen, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, whereas the soil ROC was negatively correlated with pH. We can conclude that soil ROC can sensitively respond to community succession in Xishuangbanna tropical forests. The spatiotemporal variation in soil ROC was attributed to the changes in factors (soil organic carbon, microbial carbon, total nitrogen, hydrolyzable nitrogen, ammonium nitrogen and soil pH) during the succession processes in Xishuangbanna tropical forests.

Key Words: Tropical forest; readily oxidized carbon; soil phycochemical properties; secondary succession

土壤有机碳作为地球表层系统中最大且最具活性的碳库之一,是影响全球碳循环及全球气候变化的重要因素^[1]。土壤有机碳库微小变化将导致大气 CO_2 浓度的显著变化,从而影响土壤圈与大气圈之间的碳平衡,最终可能改变全球变化的进程。据估测,全球土壤有机碳储量介于 1 395 Gt 到 2 200 Gt 之间,约占全球碳储量的 $2/3$ ^[2,3],巨大的土壤有机碳库对全球变化的影响极其显著,为此各国学者从不同角度研究土壤有机碳储量、分布及影响因素^[4]。因此,开展土壤有机碳时空动态研究对于正确评价土壤在全球变化中的地位与作用,具有十分重要的科学意义。

土壤易氧化有机碳(Readily oxidizable carbon, ROC)作为土壤有机碳的主要组成部分,对外部环境变化的响应非常敏感,ROC 的变化不同程度上反映了土壤有机碳的有效性和时效性^[5]。Blair 等^[6]将能被 330mmol/L 高锰酸钾氧化的碳称为易氧化有机碳(ROC),并认为该组分可基本区别土壤稳定性碳。目前,国内外关于土壤 ROC 的研究报道相对较少,且大部分集中在农业生态系统^[7-10]及温带与亚热带森林^[11-14]。此外,也有部分学者关注土壤 ROC 沿海拔梯度的变化^[15,16,17]。然而,关于不同次生演替阶段热带森林土壤 ROC 动态的研究,却十分缺乏。

热带森林土壤 ROC 的研究一直是全球变化研究的热点问题。目前,大多数有关土壤 ROC 的研究主要集中于单一的热带森林类型,然而关于土壤 ROC 沿热带森林不同次生演替阶段的变化研究却少见报道,人们关于森林群落恢复响应的方向、过程、强度及规律的认识十分缺乏。位于热带北缘的西双版纳地区,是我国大陆热带雨林集中分布的重要区域。由于传统农业方式及人口增加等因素的影响,热带雨林遭到严重破坏,形成了大面积处于不同演替阶段的次生演替类型。本文以中国科学院西双版纳热带植物园区内白背桐群落、野芭蕉群落、崖豆藤群落 3 种不同次生演替阶段热带森林群落为研究对象,比较不同次生演替阶段热带森林土壤 ROC 时间与空间的变化特征,分析热带森林次生演替引起土壤微生物及土壤理化性质的改变及其对土壤 ROC 时空动态的影响,进而探明土壤 ROC 对热带森林群落次生演替的响应特征,研究结果能为理解热带森林恢复过程中土壤 ROC 积累特征与影响机制提供理论参考,能够为揭示热带森林土壤碳循环规律以及热带森林对全球变化贡献,提供数据与理论支撑。

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,其地理位置为东经 $101^\circ 16'$ 、北纬 $21^\circ 55'$ 。地处东南亚热带北缘的北热带季风气候区,年平均气温 21.5°C 。一年中干湿季分明,年平均降雨量 1557mm,其中雨季(5—10 月)为 1335mm,占全年的 87%,干季(11 月—4 月)为 202 mm,仅占全年降雨量的 13%。土壤为由白垩纪砂岩发育而成的砖红壤。地带性植被类型为热带雨林和季雨林。但由于刀耕火种等人类活动的干扰与破坏,形成了一系列处于不同恢复阶段的次生森林类型。本次研究选择园区内有代表性且群落起源相似的白背桐群落、野芭蕉群落、崖豆藤群落 3 个不同恢复阶段热带森林群落,样地之间距离 100—800m 左右。样地的基本概况如下:

白背桐群落(*Mallotus paniculatus*, MP),恢复年限约 12 年,海拔 600m,盖度 65 %左右,土壤为砖红壤,枯

枝落叶层厚 1—2cm;样地主要植被:白背桐(*Mallotus paniculatus*)、高檐蒲桃(*Syzygium oblatum*)、椴叶山麻秆(*Alchornea tiliifolia*)、粉被金合欢(*Acacia pruinescens*)、野生风轮草(*Clinopodium chinensis*)、丰花草(*Borreria stricta*)等。

野芭蕉群落(*Musa acuminata*,MA),恢复年限约 28 年,海拔 535m,盖度 85 %左右,土壤为砖红壤,上覆盖枯枝落叶 2—4cm;样地主要植被:小果野芭蕉(*Musa acuminata*)、董棕(*Caryota urens*)、勐仑翅子树(*Pterospermum menglungense*)、刺通草(*Trevesia palmata*)、银叶砂仁(*Amomum sericeum*)、宽叶楼梯草(*Elatostema platyphyllum*)、密果短肠蕨(*Allantodia spectabilis*)等。

崖豆藤群落(*Mellettia leptobotrya*,ML),恢复年限约 42 年,海拔 568m,盖度 90 %左右,土壤为砖红壤,上覆盖枯枝落叶 4—5cm;样地主要植被:思茅崖豆(*Millettia leptobotrya*)、椴叶山麻秆(*Alchornea tiliifolia*)、猪肚木(*Canthium horridum*)、锈毛鱼藤(*Derris ferruginea*)、钝叶金合欢(*Acacia megaladena*)、滇南九节(*Psychotria henryi*)、刚莠竹(*Microstegium ciliatum*)、银叶砂仁(*Amomum sericeum*)等。

表 1 不同群落类型土壤理化性质大小比较

Table 1 Soil chemical and physical properties in three community types

样地 Site	土壤有机碳 SOC/ (g/kg)	微生物量碳 MBC/ (g/kg)	全氮 TN/ (g/kg)	pH 值	水解氮 HN/ (mg/kg)	铵态氮 HN ₄ ⁺ -N/ (mg/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg/kg)	土壤水分 SW/%	土壤温度 ST/℃	土壤容重 BD/ (g/cm ³)
白背桐群落 <i>Mallotus paniculatus</i>	26.93±2.23b	1.09±0.09b	0.56±0.07c	5.14±0.22a	100.30±5.45b	8.84±2.41c	1.94±0.47b	11.02±5.33c	23.17±3.95a	1.26±0.04a
野芭蕉群落 <i>Musa acuminata</i>	30.91±1.63a	1.34±0.52a	0.76±0.08a	4.7±0.27b	111.05±5.24a	10.61±3.33a	2.47±0.5a	15.70±7.13a	20.44±4.28a	1.22±0.06a
崖豆藤群落 <i>Mellettia leptobotrya</i>	30.36±1.81a	1.2±0.14b	0.64±0.08b	4.53±0.25b	101.47±3.25b	9.37±2.05b	2.37±0.51a	12.42±4.50b	21.80±3.10a	1.24±0.08b

相同小写字母表示不同群落之间没有显著差异($P>0.05$)

1.2 土壤取样与指标测定

于 2016 年 12 月,2017 年 3 月、6 月及 9 月。在以上 3 种群落中各随机选择 3 个 40m ×40m 的样地,每样地内随机布置 3 个样点。在每个小样点,按照 0—5cm、5—10cm、10—15cm 分层采集土样。采用便携式土壤水分温度测量仪(SIN-TN8)同步测定三个土层的土壤温度。采集各土层的土壤样品,用自封袋保存好,并做好标签,样品带回实验室进行土壤理化性质测定。土壤含水率(%)采用烘干称量法(105℃, 24 h);土壤容重环刀法测定;pH 采用电位法测定;土壤有机质采用油浴加热—重铬酸钾氧化法测定;土壤易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化法;土壤微生物生物量碳采用液态氯仿熏蒸浸提—水浴法^[18];全氮采用扩散法测定^[19];水解性氮采用碱解扩散法测定;铵态氮采用氧化镁浸提扩散法;硝态氮采用酚二磺酸比色法。

1.3 数据分析

将所采集数据(土壤易氧化有机碳、土壤微生物量碳、土壤有机碳、pH、全氮、土壤温度等)进行整理后用 Excel 进行作图比对分析。用 SPSS 17.0 分析不同样地间理化性质差异显著性,用 Canoco 的主成分分析(PCA)研究土壤理化性质对土壤易氧化有机碳时空动态的影响。不同月份土壤易氧化有机碳含量为各土层的加权平均值。

2 结果与分析

2.1 不同演替阶段热带森林土壤 ROC 含量的大小比较

不同演替阶段热带森林土壤 ROC 含量存在显著差异(图 1, $P<0.05$)。3 种不同次生演替阶段热带森林土壤 ROC 含量大小顺序为:野芭蕉群落(11.07 mg/g)>崖豆藤群落(10.23 mg/g)>白背桐群落(9.08 mg/g),表明热带森林土壤 ROC 含量演替后期都比演替初期大。野芭蕉群落和崖豆藤群落的土壤 ROC 含量分别是白背桐群落的 1.22 倍和 1.13 倍。

2.2 不同演替阶段热带森林土壤 ROC 含量的年变化

对不同演替阶段热带森林土壤 ROC 含量随一年中月份的变化进行分析(图2),结果表明不同演替阶段热带森林样地土壤 ROC 含量存在显著的月变化($P<0.05$)。不同演替阶段热带森林土壤 ROC 含量的月份变化均表现为6月份最高,然后逐渐降低,12月份最低。6月份不同样地土壤 ROC 含量白背桐群落为 10.29 mg/g、野芭蕉群落为 13.45 mg/g、崖豆藤群落为 11.65 mg/g;12月份不同样地土壤 ROC 含量白背桐群落为 7.6 mg/g、野芭蕉群落为 8.91 mg/g、崖豆藤群落为 8.36 mg/g。

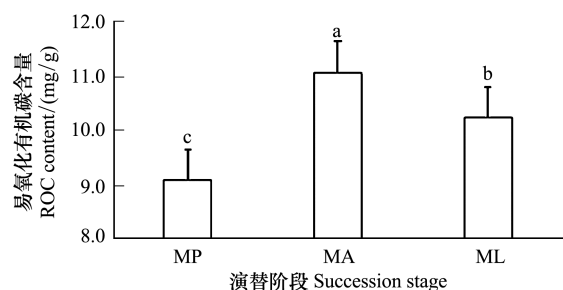


图1 热带森林不同演替阶段土壤 ROC 含量变化

Fig.1 Change of soil ROC in three secondary succession stages of tropical forests

不同字母表示不同演替阶段热带森林土壤 ROC 含量差异显著性 ($P<0.05$)

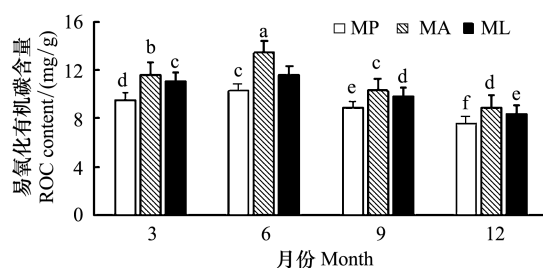


图2 不同演替群落热带森林不同月份土壤 ROC 含量变化

Fig.2 Monthly change of soil ROC in three secondary succession stages of tropical forests

不同字母表示不同演替阶段热带森林土壤 ROC 含量月份差异显著性 ($P<0.05$)

2.3 不同演替阶段热带森林土壤 ROC 含量的垂直分布

对热带森林不同土层(0—5cm、5—10cm、10—15cm)土壤 ROC 含量进行分析(图3),结果表明,ROC 随着土层深度的增加呈现减小的变化趋势,但不同演替阶段热带森林又表现出一定的差异性。3种演替阶段热带森林3个土层 ROC 含量均表现为:野芭蕉群落>崖豆藤群落>白背桐群落,且差异性显著($P<0.05$)。白背桐群落中,不同土层 ROC 含量差异最大,0—5cm 土层 ROC 含量是 10—15cm 的 1.23 倍;崖豆藤群落中,0—5cm 土层 ROC 含量是 10—15cm 的 1.22 倍;野芭蕉群落中,0—5cm 土层 ROC 含量是 10—15cm 的 1.15 倍($P<0.05$)。

2.4 土壤 ROC 与土壤理化性质的关系

采用主成分分析研究土壤理化环境变化对土壤 ROC 的影响(图4),结果表明,野芭蕉群落中,湿度、温度、容重和硝态氮等土壤指标对土壤 ROC 含量的影响最为显著。野芭蕉群落与崖豆藤群落,土壤有机碳、土壤微生物量碳、全氮、土壤水解氮和铵态氮对土壤 ROC 含量的影响最显著。土壤 pH 与土壤 ROC 呈显著的负相关,其中白背桐群落与崖豆藤群落中最为显著。按箭头夹角来看,土壤有机碳、土壤水解氮、全氮和土壤微生物量碳对土壤 ROC 影响的贡献最大。

3 讨论

3.1 热带森林次生演替对土壤 ROC 时空变化的影响

热带森林演替进程能够对土壤易氧化有机碳的积累产生重要影响。本研究中土壤易氧化有机碳含量大小顺序为:白背桐群落(9.72 mg/g)<崖豆藤群落(10.5 mg/g)<野芭蕉群落(11.38 mg/g),表明土壤易氧化有

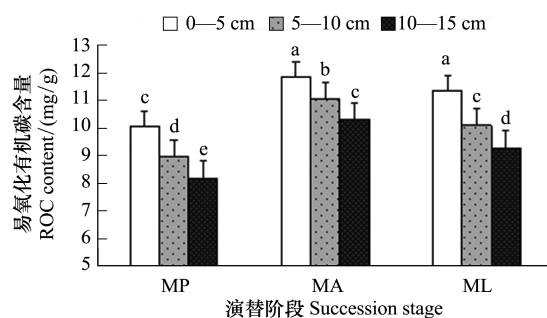


图3 热带森林不同演替群落土壤 ROC 含量垂直变化

Fig.3 Vertical variation of soil ROC concentration in three secondary succession stages of tropical forests

不同字母表示不同演替阶段热带森林土壤 ROC 含量垂直分布差异显著性 ($P<0.05$)

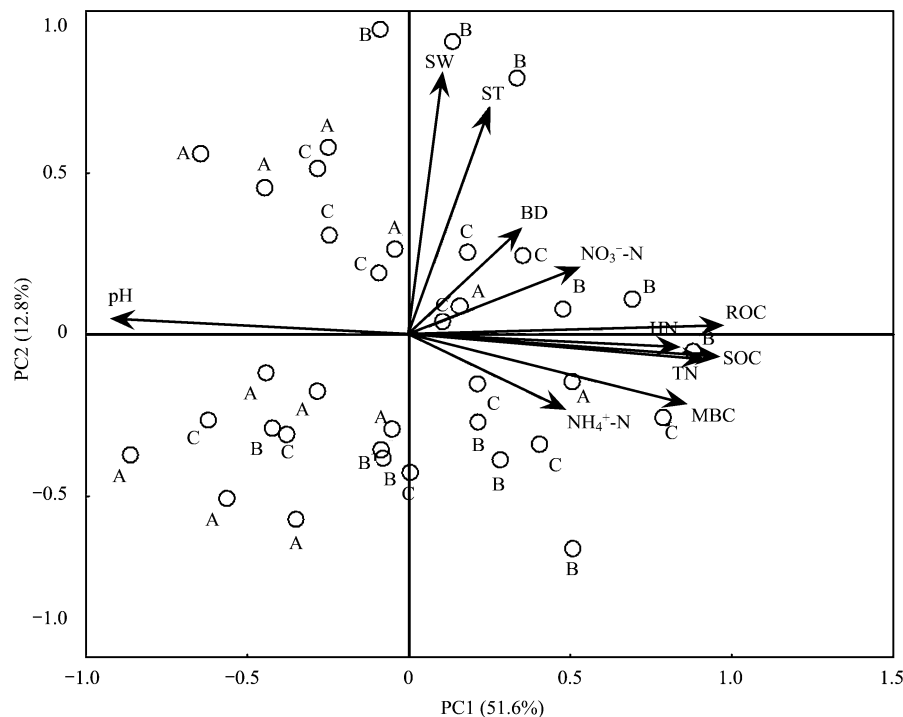


图 4 不同演替阶段土壤理化性质对土壤易氧化有机碳影响的主成分分析

Fig.4 Principal component analysis for the effect of soil physicochemical properties on soil ROC across three succession stages

A: 白背桐群落 MP; B: 野芭蕉群落 MA; C: 崖豆藤群落 ML; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; HN: 水解氮 Hydrolyzable nitrogen; $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 铵态氮 Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 硝态氮 Nitrate nitrogen; SW: 土壤水分 Soil water; ST: 土壤温度 Soil temperature; BD: 容重 Bulk density

机碳的含量在演替中期都比演替初期大。一般而言,由于土壤 SOC 含量易受森林植被覆盖、凋落物及土壤环境条件影响,从而导致土壤易氧化有机碳含量随植被演替的进程呈增大的趋势^[20]。土壤易氧化有机碳对环境变化比较敏感,作为演替初期的白背桐群落,其植被组成、结构及多样性较简单,群落内温湿度环境不稳定、地上植被向土壤输入的有机物数量偏少,故土壤易氧化有机碳含量较低;随着恢复年限的增加,野芭蕉群落和崖豆藤群落由于其植被与环境趋于稳定与复杂,土壤易氧化有机碳含量显著提升。土壤易氧化有机碳积累可能受演替年限与样地微生境的共同影响,本研究中,野芭蕉群落地处沟谷,常有溪水流过,土壤含水率相对较高,能够促进土壤易氧化有机碳的生物积累,从而导致野芭蕉群落土壤易氧化有机碳含量最高。

热带森林次生演替对土壤易氧化有机碳的时间变化产生了显著影响。研究表明,土壤易氧化有机碳易受到森林凋落物数量、土壤温湿度、微生物组成等时间动态的影响,从而形成了不同次生演替阶段热带森林土壤易氧化有机碳随月份变化的差异性^[21,22]。本研究中,白背桐群落、崖豆藤群落及野芭蕉群落,在不同月份土壤 ROC 含量之间的差异都达到了显著水平,说明 ROC 对不同植被演替阶段样地环境因素的月份变化较敏感,这与前人的研究结论相一致^[23]。不同演替阶段热带森林土壤易氧化有机碳含量时间变化,表现为 6 月最高及 12 月最低。这种变化规律与辜翔等^[24]对湘中丘陵区杉木人工林、马尾松-石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、石栎-青冈等 4 种常绿阔叶林土壤易氧化有机碳含量季节变化相类似,即夏季较高、冬季较低。这可能与夏季土壤温度较高、湿度较大,使得凋落物分解加快,根系分泌物也增多,有利于土壤易氧化有机碳的转化与积累^[25,26],而 12 月植物生长缓慢,土壤微生物的活性降低,微生物量碳减小,不利于土壤易氧化有机碳的沉积。

热带森林次生演替对土壤易氧化有机碳的垂直分布产生了显著影响。研究表明,地上植被向土壤有机质的输入主要集中在土壤表层^[27,28]。本研究表明,土壤易氧化有机碳沿土层深度的分布呈减少的变化趋势。

这与张俊华等^[29]对海南热带橡胶园土壤的研究结果相一致。同时,不同次生演替阶段热带森林群落土壤易氧化有机碳含量与土壤有机碳极显著正相关($P<0.01$)。土壤易氧化有机碳这种垂直变化主要与表层输入土壤总有机碳的质量密切相关^[30,31]。随着土层深度的增加,土壤易氧化有机碳占土壤总有机碳的比例呈显著下降趋势,这与 Wang 等^[32]的研究结果基本一致。另外,不同演替阶段热带森林具有不同的植被覆盖度及多样性,显著影响植被对土壤有机质的输入^[33,34],从而导致同一土层中不同样地之间存在显著差异。

3.2 理化性质对不同演替阶段热带森林土壤 ROC 的影响

主成分分析结果表明,热带森林次生演替主要引起土壤有机碳、微生物量碳、全氮、水解氮、铵态氮等土壤理化环境改变,从而对土壤易氧化有机碳含量产生显著影响,同时存在样地的差异性。一般而言,野芭蕉群落的土壤理化性质对土壤 ROC 含量的影响最为显著。不同热带森林群落导致凋落物输入的种类与数量不同,进而影响着微生物群体的数量^[35],野芭蕉群落微生物量最高,从而形成了该样地具有较高的土壤碳积累与利用效率^[36];热带森林演替能够引起土壤全氮含量的增加进而对土壤易氧化有机碳产生显著影响。这与孙伟军等^[37]对湖南省长沙县不同森林类型土壤氮对土壤易氧化有机碳影响结果一致。这是因为土壤中氮含量会影响微生物对其的分解、利用速度^[15],同时也影响向土壤中输入有机质的数量和质量,从而对土壤易氧化有机碳含量产生一定影响^[38-39]。土壤全氮含量演替初期最小(表1),说明热带森林群落演替能够通过改变全氮含量,进而影响土壤易氧化有机碳的积累。

热带森林演替能够引起土壤 pH 的改变进而对土壤易氧化有机碳产生显著影响。土壤 pH 值通过影响土壤微生物的类群和活性,进而影响着土壤易氧化有机碳的含量^[40]。关于土壤易氧化有机碳与 pH 值二者之间的关系,不同学者得出不同的研究结论,王棣等^[41]对秦岭典型林分的研究,认为土壤易氧化有机碳含量与 pH 值不存在显著相关性,但马和平等^[42]对西藏色季拉山不同林分的研究,则认为土壤易氧化有机碳含量与 pH 值存在显著负相关,王国兵等^[43]对苏北沿海 4 种不同土地利用方式的研究,认为土壤易氧化有机碳与 pH 值存在极显著负相关。本研究表明,3 种不同次生演替热带森林土壤易氧化有机碳均与土壤 pH 值呈极显著负相关($P<0.01$),其中白背桐群落与崖豆藤群落中最为显著。因此,土壤 pH 能够对 ROC 时空变化产生重要影响。

4 结论

西双版纳热带森林植物群落演替过程中土壤易氧化有机碳(ROC)具有显著的时空变化,表明土壤 ROC 能够敏感反映热带森林群落演替过程中的植被与土壤环境变化。西双版纳热带森林群落土壤 ROC 积累受植被演替年限与样地微生境的共同影响。热带森林恢复能够引起土壤微生物量碳、总有机碳、pH 值、全氮等土壤理化性质的改变,进而显著影响土壤 ROC 的时空变化。因此,这些土壤因子是调控不同演替阶段热带森林土壤 ROC 时空动态的主要因素。

参考文献(References):

- [1] 李斌,程小琴,元晋芳,王烁鑫,韩海荣,康峰峰,桂志宏.模拟硫沉降对华北落叶松人工林土壤有机碳组分的影响.生态学报,2018,37(1):82-88.
- [2] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298(5870):156-159.
- [3] 颜安.新疆土壤有机碳/无机碳空间分布特征及储量估算[D].北京:中国农业大学,2015,1.
- [4] 刘留辉,邢世和,高承芳,崔纪超,魏多落,胡争辉,卢超.国内外土壤碳储量研究进展和存在问题及展望.土壤通报,2009,40(3):697-700.
- [5] 袁知洋,邓邦良,刘宇新,李志,牛德奎,郭晓敏.武功山草甸植被小群落土壤活性有机碳与土壤养分的典型相关分析.中南林业科技大学学报,2016,36(2):84-90.
- [6] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7):1459-1466.
- [7] 王莹,阮宏华,黄亮亮,冯育青,齐艳.围湖造田不同土地利用方式土壤有机碳和易氧化碳.生态环境学报,2010,19(4):913-918.
- [8] 王艳,杨丽娟,周崇峻,储慧霞.长期施肥对设施蔬菜栽培土壤易氧化有机碳含量及其剖面分布的影响.水土保持通报,2010,30(4):32-35.

- [9] 史康健,周怀平,杨振兴,解文艳,程曼. 长期施肥下褐土易氧化有机碳及有机碳库的变化特征. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 542-552.
- [10] 刘敏,杨永锋,刘国顺,可钰,陈红丽,何春莉. 不同有机物料配施化肥对植烟土壤不同形态有机碳的影响. 土壤通报, 2017, 48(4): 901-907.
- [11] 涂利华,胡庭兴,张健,李仁洪,何远洋,田祥宇,肖银龙,景建飞. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤活性有机碳库和根生物量的影响. 生态学报, 2010, 30(9): 2286-2294.
- [12] 刘荣杰,吴亚丛,张英,李正才,马少杰,王斌,格日乐图. 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较. 植物生态学报, 2012, 36(5): 431-437.
- [13] 贾重建,刘红宜,卢瑛,陈冲,熊凡,崔启超. 土地利用方式对土壤有机碳和团聚体组分特征的影响. 热带地理, 2014, 34(5): 681-689.
- [14] 张玲,张东来,毛子军. 小兴安岭阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳及各组分特征. 林业科学, 2017, 53(9): 11-17.
- [15] 徐侠,王丰,栾以玲,汪家社,方燕鸿,阮宏华. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1115-1121.
- [16] 向成华,栾军伟,骆宗诗,宫渊波. 川西海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布. 生态学报, 2010, 30(4): 1025-1034.
- [17] Zhang M, Zhang X K, Liang W J, Jiang Y, Dai G H, Wang X C, Han S J. Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai Mountain, China. *Pedosphere*, 2011, 21(5): 615-620.
- [18] 陈果,刘岳燕,姚槐应,黄昌勇. 一种测定淹水土壤中微生物生物量碳的方法:液氮熏蒸浸提—水浴法. 土壤学报, 2006, 43(6): 981-988.
- [19] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 北京:科学出版社, 1983, 08.
- [20] 耿玉清,余新晓,岳永杰,李金海,张国桢,刘松. 北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 19-24.
- [21] 张雪,韩士杰,王树起,谷越,岳琳艳,冯月,耿世聪,陈志杰. 长白山白桦林不同演替阶段土壤有机碳组分的变化. 生态学杂志, 2016, 35(2): 282-289.
- [22] 刘明慧,孙雪,于文杰,秦立武,冯富娟. 长白山不同海拔原始红松林土壤活性有机碳含量的生长季动态. 南京林业大学学报:自然科学版, 2018, 42(2): 67-74.
- [23] 石亚攀,陈立新,段文标,张雪,徐非,刘晓锐. 红松阔叶混交林林隙土壤总有机碳和易氧化有机碳的时空异质性研究. 水土保持学报, 2013, 27(6): 186-192.
- [24] 辜翔,张仕吉,项文化,李雷达,刘兆丹,孙伟军,方晰. 中亚热带4种森林类型土壤活性有机碳的季节动态特征. 植物生态学报, 2016, 40(10): 1064-1076.
- [25] 徐秋芳. 森林土壤活性有机碳库的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004, 36-37.
- [26] 张剑,汪思龙,王清奎,刘燕新. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 41-47.
- [27] 张海东,于东升,王宁,史学正,宋正珊,顾成军. 植被恢复过程中侵蚀红壤有机质变化研究. 土壤, 2013, 45(5): 856-861.
- [28] 朱丽琴,黄荣珍,段洪浪,贾龙,王赫,黄诗华,易志强,张文锋. 红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响. 生态学报, 2017, 37(1): 249-257.
- [29] 张俊华,丁维新,孟磊. 海南热带橡胶园土壤易氧化有机碳空间变异特征研究. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2563-2567.
- [30] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究. 林业科学, 2005, 41(1): 10-13.
- [31] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,黄宇. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
- [32] Wang Y, Ruan H H, Huang L L, Feng Y Q, Qi Y, Zhou J Z, Shen Y L. Soil labile organic carbon with different land uses in reclaimed land area from Taihu Lake. *Soil Science*, 2010, 175(12): 624-630.
- [33] Tianna S, Culman S W, Ferris H, Buckley D H, Glover J D. No-tillage conversion of harvested perennial grassland to annual cropland reduces root biomass, decreases active carbon stocks, and impacts soil biota. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(1/2): 25-32.
- [34] Thorburn P J, Meier E A, Collins K, Robertson F A. Changes in soil carbon sequestration, fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific. *Soil and Tillage Research*, 120(2012): 99-111.
- [35] 田松岩,刘延坤,沃晓棠,李云红,陈瑶. 小兴安岭3种原始红松林的土壤有机碳研究. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 33-38.
- [36] Bauhus J, Pare D C, Cote L. Effects of tree species stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(8): 1077-1089.
- [37] 孙伟军,方晰,项文化,张仕吉,李胜蓝. 湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征. 生态学报, 2013, 33(24): 7765-7773.
- [38] Chen X M, Li Y L, Mo J M, Otieno D, Tenhunen J, Yan J H, Liu J X, Zhang D Q. Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon fractions in the subtropical forest ecosystems of S China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 175(6): 947-953.
- [39] Chen X M, Liu J X, Deng Q, Yan J H, Zhang D Q. Effects of elevated CO₂ and nitrogen addition on soil organic carbon fractions in a subtropical forest. *Plant and Soil*, 2012, 357(1/2): 25-34.
- [40] 梁俭. 三峡库区消落带土壤溶解性有机质淹水释放行为与结构表征[D]. 重庆:西南大学, 2016, 67-68.
- [41] 王棣,耿增超,余雕,和文祥,侯琳. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1569-1577.
- [42] 马和平,郭其强,刘合满,钱登锋. 西藏色季拉山土壤微生物量碳和易氧化态碳沿海拔梯度的变化. 水土保持学报, 2012, 26(4): 163-166, 171-171.
- [43] 王国兵,赵小龙,王明慧,阮宏华,徐长柏,徐亚明. 苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化碳含量的影响. 应用生态学报, 2013, 24(4): 921-926.