



•研究报告•

蚂蚁筑巢对不同恢复阶段热带森林土壤 易氧化有机碳时空动态的影响

张 哲 王邵军* 陈闽昆 曹 润 李少辉

(西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224)

摘要: 为探明热带森林恢复过程中蚂蚁筑巢对土壤易氧化有机碳(readily oxidizable carbon, ROC)时空动态的影响及机制, 本研究以西双版纳白背桐(*Mallotus paniculatus*)群落、野芭蕉(*Musa acuminata*)群落和崖豆藤(*Mellettia leptobotrya*)群落3种恢复阶段热带森林为研究对象, 设置“蚂蚁筑巢地”与“非巢地”2种处理进行野外控制实验, 对比分析蚁巢和非蚁巢土壤ROC含量的时空变化特征, 并揭示这些变化与土壤微生物生物量碳及理化性质之间的相互关系。结果表明: (1)蚂蚁筑巢显著影响热带森林土壤ROC含量($P < 0.05$), 蚁巢土壤ROC含量较非蚁巢提高了14.2%。不同恢复阶段蚁巢与非蚁巢土壤ROC含量大小顺序为: 野芭蕉群落 > 崖豆藤群落 > 白背桐群落。(2)不同恢复阶段热带森林蚁巢与非蚁巢土壤ROC含量均呈单峰型的时间变化趋势($P < 0.05$), 最大值出现在6月, 且各月份蚁巢土壤ROC含量均高于非蚁巢。(3)不同恢复阶段热带森林蚁巢和非蚁巢土壤ROC含量均随土层深度增加呈显著递减的垂直变化趋势($P < 0.05$), 且蚁巢土壤ROC含量均大于非蚁巢($P < 0.05$)。 (4)蚂蚁筑巢引起的土壤理化性质变化对土壤ROC含量产生了一定的影响。土壤ROC含量与土壤pH和容重呈显著负相关($P < 0.05$), 与土壤有机碳、微生物生物量碳、全氮、铵态氮及硝态氮呈显著正相关($P < 0.05$)。土壤微生物生物量碳与总有机碳是蚁巢土壤ROC时空变化的主要贡献者, 而铵态氮、全氮和总有机碳是非蚁巢ROC时空变化的主控因子。因此, 蚂蚁筑巢改变热带森林土壤微生物量(如微生物生物量碳)及土壤理化性质(如总有机碳、铵态氮与全氮等), 进而显著影响土壤ROC的时空动态。

关键词: 蚂蚁筑巢; 易氧化有机碳; 土壤理化性质; 时空动态

Effect of ant colonization on spatiotemporal dynamics of readily oxidizable soil carbon across different restoration stages of tropical forests

Zhe Zhang, Shaojun Wang*, Minkun Chen, Run Cao, Shaohui Li

College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224

Abstract: This study aimed to understand the mechanism of ant colonization on spatiotemporal variations of soil ROC (readily oxidizable carbon) during the restoration of tropical forests. The experiment was conducted with two treatments (ant nests and without nests) in three restoration stages of Xishuangbanna tropical forests (i.e. *Mallotus paniculatus*, *Musa acuminata*, and *Mellettia leptobotrya* communities). We compared the spatiotemporal dynamics of ROC concentrations in both treatments and concurrently measured soil microbial biomass carbon and physicochemical properties. The results showed that: (1) Ant colonization significantly affected soil ROC concentrations in the tropical forests ($P < 0.05$), and ROC concentrations in ant nests increased by 14% compared with the control soils. Soil ROC concentrations in three recovery stages were ranked as *Musa acuminata* community > *Mellettia leptobotrya* community > *Mallotus paniculatus* community. (2) ROC concentrations in ant nests and the control soils both showed unimodal temporal variations across the three restoration stages ($P < 0.05$). The maximum was observed in June, and monthly ROC concentrations were higher in ant nests than in the control soils. (3) ROC concentrations in ant nests

收稿日期: 2019-01-14; 接受日期: 2019-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(31660191; 41461052)、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教育厅科学研究基金(2018Y129)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shaojunwang2009@163.com

and the control soils decreased along the soil profile across three restoration stages ($P < 0.05$), and they were higher in ant nests ($P < 0.05$). (4) Variations in soil physicochemical properties induced by ant colonization influenced soil ROC dynamics. Soil ROC was negatively correlated with soil pH and bulk density and positively correlated with soil organic carbon, microbial biomass carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen ($P < 0.05$). Microbial biomass carbon and total organic carbon in soils were the main contributors to the spatiotemporal variation in ROC in ant nests, while ammonium nitrogen, total nitrogen and total organic carbon were the main controlling factors for the spatiotemporal variation in ROC in control soils. Overall, ant colonization significantly altered soil microbes (e.g. microbial biomass carbon) and soil physicochemical properties (e.g. total organic carbon, ammonium nitrogen and total nitrogen), which impacted spatiotemporal variations in ROC concentrations in the tropical forest soils.

Key words: ant colonization; readily oxidizable carbon; soil physicochemical properties; spatiotemporal dynamics

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)作为土壤的重要组成部分,是土壤微生物在不同分解阶段产生的复杂混合物,在调节土壤理化性质、土壤生产力的形成和减缓全球温室效应等方面发挥着重要作用(陈晓侠等, 2012)。森林土壤有机碳储量作为陆地生态系统碳库的重要组成部分,约占全球土壤有机碳储量的39%,土壤有机碳固存的微小变化可能导致大气CO₂浓度的显著变化(刘延惠等, 2012)。然而,土壤有机碳通常对土壤环境的变化不敏感(Chen et al, 2017),其短期波动主要源于易氧化或易分解部分的变化(Matías et al, 2012)。土壤易氧化有机碳是土壤有机碳中最重要和最敏感的组分,可作为表征土壤有机碳和土壤肥力变化的重要指标(王清奎等, 2005)。Blair等(1995)将能被330 mol/L高锰酸钾氧化的碳称为易氧化有机碳(readily oxidizable carbon, ROC),并认为该组分可基本区别土壤稳定性碳。因此,土壤ROC可以作为衡量土壤碳库稳定性的指示因子(陈小花等, 2017)。目前,森林土壤ROC在区域或全球尺度上的分布格局存在极大的时空变异性。随着全球气候变化的加剧,森林土壤ROC含量的时空动态研究已成为全球碳循环研究的热点问题之一(沃晓棠等, 2014)。

蚂蚁作为主要的土壤大型节肢动物,是食物网中的土壤工程师,在生态系统的碳循环和能量流动中发挥着重要作用(Folgarait et al, 2002)。蚁巢的建造与持续维护改变了土壤微生物及理化性质,直接或间接地影响土壤ROC的时空动态。一方面蚂蚁通过觅食和筑巢活动将有机物(如花蜜、植物组织和昆虫尸体等)搬入巢中,其中巢内产生的氨基酸、碳水化合物或其他有机化合物往往与ROC含量的积累

密切相关(Duval et al, 2016; Tripathi et al, 2016),进而直接增加巢内或周围土壤的ROC含量(Kilpelinen et al, 2007)。另一方面,蚂蚁筑巢能够影响区域小气候、土壤理化环境以及土壤微生物丰度与多样性(刘任涛等, 2009),间接调节土壤碳的转化过程,从而影响土壤ROC的积累(贺虹等, 2011)。目前,蚂蚁的研究主要集中于它们的多样性,而关于蚂蚁对森林土壤特别是热带森林土壤中ROC时空动态的影响研究却十分缺乏。

位于热带北缘的西双版纳是我国大陆热带雨林集中分布的重要区域,该区地貌复杂、小气候多样,是我国蚂蚁区系及多样性最为丰富的地区(杨效东等, 2001)。热带森林复杂的蚂蚁区系组成及其活动可能会显著改变土壤性质及土壤碳形成与转化的生态过程(Wang et al, 2017),进而影响土壤ROC的时空动态。因此,本文以西双版纳3种恢复阶段的热带森林群落为研究对象,比较蚂蚁筑巢地和非巢地土壤ROC的时空动态,并分析蚂蚁筑巢对土壤ROC的影响,不仅有助于理解西双版纳热带森林恢复过程中土壤ROC的积累特征,也助于理解调控热带森林土壤ROC形成的生物学机制。

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(101°16' E, 21°55' N),地处东南亚热带北缘,属北热带季风气候区,年平均气温21.5℃。年平均降水量1,557 mm,其中雨季(5–10月)为1,335 mm,占全年的87%,干季(11月至次年4月)为202 mm,仅占全年降水量的13%。土壤为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。本研究选择园区内有代表性且群落起源相似的3个恢复阶段的热带森林,群落间距离100–800 m。群落基本概况如下:

(1)白背桐群落(*Mallotus paniculatus* community, 简称MP),恢复年限约12年(王邵军等, 2016),海拔600 m。盖度65%左右,土壤为砖红壤,枯枝落叶层厚1–2 cm。主要植物有白背桐、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*)。

(2)野芭蕉群落(*Musa acuminata* community, 简称MA),恢复年限约28年(王邵军等, 2016),海拔535 m。盖度85%左右,土壤为砖红壤,枯枝落叶层厚2–4 cm。主要植物有小果野芭蕉(*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*)及密果短肠蕨(*Allantodia spectabilis*)。

(3)崖豆藤群落(*Mellettia leptobotrya* community, 简称ML),恢复年限约42年(王邵军等, 2016),海拔568 m。盖度90%左右,土壤为砖红壤,枯枝落叶层厚4–5 cm。主要植物有思茅崖豆(*Millettia leptobotrya*)、椴叶山麻秆、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*)及银叶砂仁。

1.2 土壤取样及理化性质测定

在每个群落中随机设置3个样地(40 m × 40 m, 间隔15 m),并在每个样地中随机设立3个样方,在样方中选择10个平均直径约4–5 cm的蚁巢(蚂蚁巢穴采用诱捕法确定),同时在距离每个蚁巢5 m外设置1个对照样点(非巢地)(Holec & Frouz, 2006),采样时间为2016年12月,2017年3月、6月及9月。

采用便携式土壤水分/温度测量仪(SIN-TN8),测定巢穴与非筑巢地3个土层(0–5 cm、5–10 cm和10–15 cm)的土壤温度,并用环刀法采集土样测定土壤容重。为获得巢穴真实的土壤理化性质,破坏性采集各层土壤样品,自封袋保存并标签记录,带

回实验室进行土壤指标测定。

土壤含水率(%)采用烘干法测定(105℃, 24 h); pH值电位法测定;土壤有机质采用油浴加热–重铬酸钾容量法测定;土壤易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化法测定;土壤生物量碳采用氯仿水浴法测定;全氮采用扩散法测定;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测定;硝态氮采用酚二磺酸比色法测定。

1.3 数据分析

将所采集的数据(土壤易氧化有机碳、土壤微生物生物量碳、土壤有机碳、全氮、pH、土壤温度等理化性质)进行整理,采用Excel进行作图并用SPSS 22.0软件进行比对分析。不同月份蚁巢和非蚁巢土壤易氧化有机碳含量为各土层的加权平均值。用独立样本 t 检验分析不同群落间理化性质的差异,用Canoco的主成分分析(PCA)判别土壤易氧化有机碳与土壤理化性质的相互关系。

2 结果

2.1 不同恢复阶段热带森林蚁巢与非蚁巢土壤ROC含量

3种恢复阶段热带森林蚁巢土壤ROC含量(10.13 mg/g)均显著高于非蚁巢(8.87 mg/g)(图1, $P < 0.05$),平均提高了14.2%。3种恢复阶段森林蚁巢土壤ROC含量大小为白背桐群落(9.05 ± 1.28) mg/g < 崖豆藤群落(10.13 ± 1.58) mg/g < 野芭蕉群落(11.22 ± 1.62) mg/g; 非巢地土壤ROC含量大小为白背桐

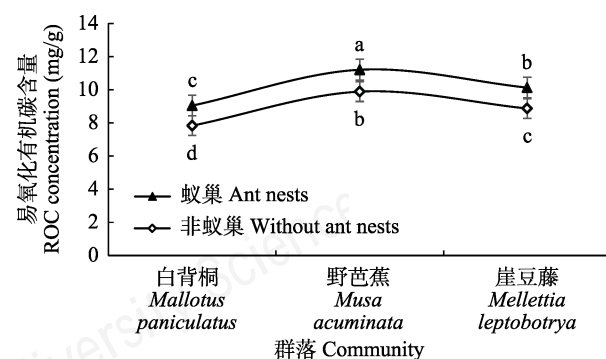


图1 不同恢复阶段热带森林蚁巢与非蚁巢土壤易氧化有机碳含量比较。不同字母表示蚁巢与非蚁巢土壤易氧化有机碳含量差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 1 Comparison of readily oxidizable carbon (ROC) concentrations in ant nests and the control soils across the three restoration stages of tropical forests. Different letters indicate significant differences between ant nests and control soils ($P < 0.05$).

群落(7.84 ± 1.16) mg/g < 崖豆藤群落(8.88 ± 1.27) mg/g < 野芭蕉群落(9.90 ± 0.97) mg/g。与恢复初期相较而言, 热带森林的恢复显著提高了土壤 ROC 含量。

2.2 不同恢复阶段热带森林蚁巢与非蚁巢土壤 ROC 的时间变化

不同恢复阶段热带森林蚁巢与非蚁巢土壤 ROC 含量随月份均呈单峰型变化, 即6月> 3月> 9

月> 12月 (图2)。除12月白背桐和野芭蕉群落蚁巢和非蚁巢土壤 ROC 含量差异不显著外, 其他各月蚁巢土壤 ROC 含量均显著高于非蚁巢(图2)。

2.3 不同恢复阶段热带森林蚁巢与非蚁巢土壤 ROC 含量的垂直分布

同一群落类型蚁巢各土层土壤 ROC 含量均高于非蚁巢, 同时蚁巢与非蚁巢土壤 ROC 含量均随着土层深度的增加呈现减小的变化趋势(图3)。3种恢

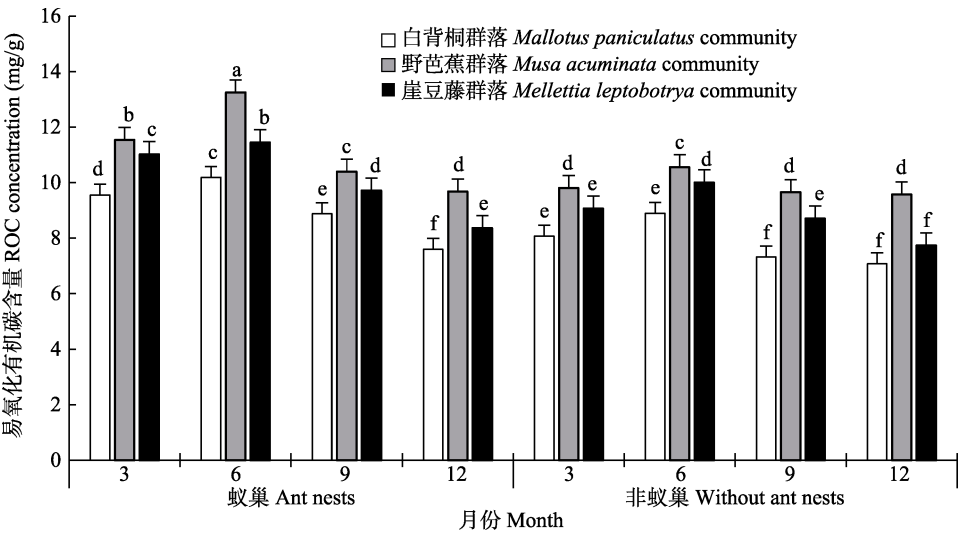


图2 不同恢复阶段热带森林蚁巢与非蚁巢土壤易氧化有机碳含量的时间变化。不同字母表示蚁巢与非蚁巢土壤易氧化有机碳含量在同一月份间差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 2 Temporal changes of readily oxidizable carbon (ROC) concentrations in ant nests and control soils across the three restoration stages of tropical forests. Different letters indicate significant difference between ant nests and the control soils ($P < 0.05$).

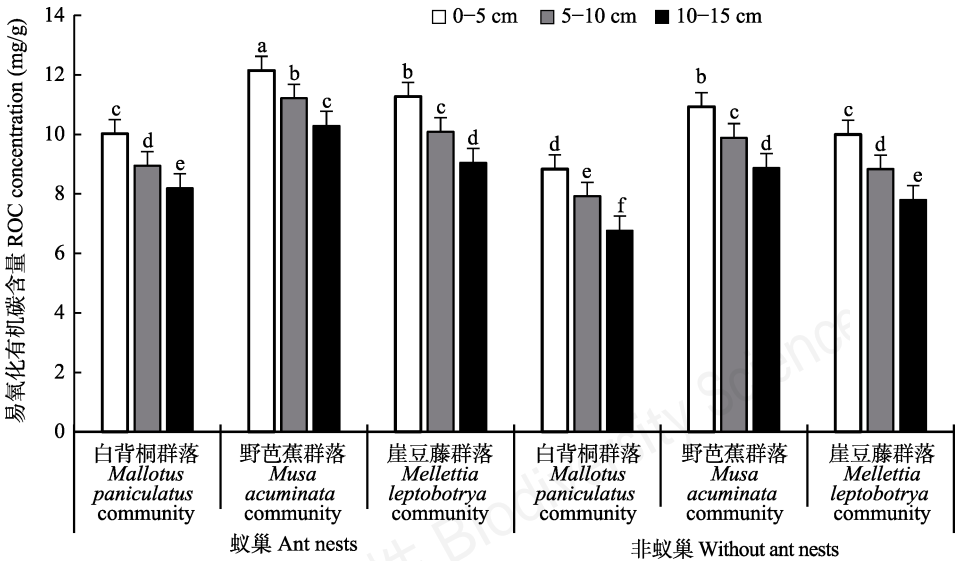


图3 不同恢复阶段热带森林群落蚁巢与非蚁巢土壤易氧化有机碳含量的垂直变化。同一群落类型中不同字母表示蚁巢与非蚁巢土壤易氧化有机碳含量垂直分布差异性显著($P < 0.05$)。

Fig. 3 Vertical variation of readily oxidizable carbon (ROC) concentrations in ant nests and the control soils across the three restoration stages of tropical forests. Different letters indicate differences in vertical variations of ROC concentrations in ant nests and control soils ($P < 0.05$).

复阶段热带森林群落蚁巢与非蚁巢不同土层土壤 ROC 含量均表现为: 野芭蕉群落 > 崖豆藤群落 > 白背桐群落 ($P < 0.05$)。蚁巢土壤中, 崖豆藤群落不同土层 ROC 含量之间差异最大, 0–5 cm 土层是 10–15 cm 的 1.25 倍; 非蚁巢土壤中, 白背桐群落不同土层 ROC 含量之间差异最大, 0–5 cm 土层是 10–15 cm 的 1.31 倍。

2.4 蚁巢与非蚁巢土壤 ROC 含量与土壤理化性质的关系

相对非蚁巢而言, 蚂蚁筑巢显著增加了土壤微生物生物量碳、土壤有机碳、全氮、水解氮、铵态氮和土壤温度 ($P < 0.05$), 显著降低了土壤 pH 值和土壤容重 ($P < 0.05$) (表 1)。

主成分分析结果表明(图 4), 蚁巢土壤中, 野芭蕉群落土壤硝态氮、水解氮、全氮及水分显著影响土壤 ROC 含量, 白背桐群落与崖豆藤群落土壤总有机碳、微生物生物量碳和铵态氮对土壤 ROC 含量的影响显著; 3 个群落土壤温度对土壤 ROC 具有显著影响, 土壤 pH 值、容重与土壤 ROC 呈显著负相关。按箭头夹角来看, 土壤微生物生物量碳与土壤总有机碳对土壤 ROC 含量的贡献最大。

非蚁巢土壤中, 3 个群落土壤容重、硝态氮、水分及温度对土壤 ROC 含量的影响显著, 土壤容重、pH 值、水解氮与土壤 ROC 呈显著负相关。野芭蕉群落与崖豆藤群落土壤有机碳、铵态氮、全氮和土壤微生物生物量碳对土壤 ROC 含量的影响显著。按箭头夹角来看, 铵态氮、全氮和土壤总有机碳对土壤 ROC 含量影响的贡献最大。

3 讨论

3.1 不同恢复阶段蚁巢地与非巢地土壤易氧化有机碳的时空特征

西双版纳热带森林恢复进程对土壤易氧化有机碳的积累产生了重要影响。蚁巢和非巢地土壤易氧化有机碳含量大小顺序为: 野芭蕉群落 > 崖豆藤群落 > 白背桐群落, 表明热带森林恢复增加了土壤的易氧化有机碳含量。一般而言, 不同森林群落具有不同的植被覆盖、凋落物及根系输入、土壤生物及理化性质, 从而使土壤有机碳分布具有差异性(赵溪竹, 2010)。已有研究表明, 土壤 ROC 含量随着森林演替的进行呈上升趋势(张宏等, 2013; 张雪等, 2016)。本研究也表明, 从演替初期的白背桐群

表 1 不同恢复阶段热带森林群落蚁巢和非蚁巢土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties in ant nests and the control soils across the three restoration stages of tropical forests

| 群落类型 Community type | 土壤类型 Soil type | 微生物量碳 MBC (g/kg) | 土壤有机碳 SOC (g/kg) | 全氮 TN (g/kg) | pH | 水解氮 HN (mg/kg) | 铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg/kg) | 硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg/kg) | 土壤含水率 Soil water (%) | 土壤温度 Soil temperature (°C) | 容重 BD (g/cm ³) |
|---|-------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--|--|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 白背桐群落 <i>Mallotus paniculatus</i> community | 蚁巢 Nest | 1.41 ± 0.14 ^b | 25.76 ± 2.77 ^b | 0.87 ± 0.17 ^b | 4.17 ± 0.59 ^c | 99.89 ± 6.61 ^b | 9.70 ± 1.47 ^a | 2.06 ± 0.60 ^a | 9.51 ± 1.61 ^b | 23.14 ± 3.82 ^a | 1.21 ± 0.07 ^c |
| | 非蚁巢 Control | 0.80 ± 0.19 ^a | 22.47 ± 2.86 ^c | 0.71 ± 0.10 ^a | 5.15 ± 0.53 ^a | 88.47 ± 8.52 ^c | 7.75 ± 3.40 ^b | 1.70 ± 0.28 ^a | 8.06 ± 1.29 ^c | 22.28 ± 3.96 ^b | 1.28 ± 0.09 ^b |
| 野芭蕉群落 <i>Musa acuminata</i> community | 蚁巢 Nest | 1.56 ± 0.16 ^a | 29.32 ± 3.31 ^a | 1.07 ± 0.25 ^a | 4.02 ± 0.77 ^c | 111.97 ± 12.04 ^b | 10.99 ± 1.64 ^a | 2.21 ± 0.70 ^a | 12.52 ± 2.02 ^a | 21.76 ± 3.59 ^b | 1.19 ± 0.04 ^c |
| | 非蚁巢 Control | 1.05 ± 0.25 ^b | 25.43 ± 2.64 ^b | 0.89 ± 0.18 ^b | 4.70 ± 0.43 ^a | 95.78 ± 9.70 ^c | 9.10 ± 2.38 ^b | 2.00 ± 0.34 ^a | 11.47 ± 2.14 ^a | 20.14 ± 4.41 ^c | 1.25 ± 0.06 ^b |
| 崖豆藤群落 <i>Mellettia leptobotrya</i> community | 蚁巢 Nest | 1.52 ± 0.13 ^a | 28.02 ± 3.01 ^a | 1.00 ± 0.24 ^a | 4.11 ± 0.45 ^c | 100.88 ± 10.29 ^b | 10.45 ± 1.83 ^a | 2.20 ± 0.75 ^a | 10.43 ± 1.39 ^b | 21.63 ± 2.93 ^b | 1.20 ± 0.05 ^c |
| | 非蚁巢 Control | 0.92 ± 0.17 ^c | 24.40 ± 3.00 ^b | 0.83 ± 0.13 ^b | 4.53 ± 0.56 ^b | 91.73 ± 9.69 ^c | 9.09 ± 1.36 ^b | 1.94 ± 0.39 ^a | 9.07 ± 1.46 ^c | 20.69 ± 3.24 ^c | 1.41 ± 0.29 ^a |

同一列中相同小写字母表示不同群落之间没有显著差异 ($P > 0.05$)

The same lowercase letters indicate no significant differences of three forest communities ($P > 0.05$). MBC, Microbial biomass carbon; SOC, Soil organic carbon; TN, Total nitrogen; HN, Hydrolyzable nitrogen; NH₄⁺-N, Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N, Nitrate nitrogen; BD, Bulk density.

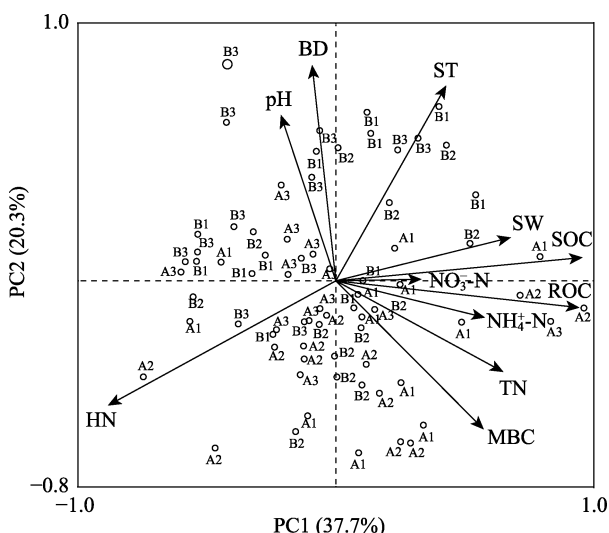


图4 不同恢复阶段热带森林土壤理化性质对蚁巢和非蚁巢土壤易氧化有机碳(ROC)影响的主成分分析。A: 蚁巢; B: 非蚁巢。1: 白背桐群落; 2: 野芭蕉群落; 3: 崖豆藤群落。SOC: 土壤有机碳; MBC: 微生物生物量碳; TN: 全氮; HN: 水解氮; $\text{NH}_4\text{-N}$: 铵态氮; $\text{NO}_3\text{-N}$: 硝态氮; SW: 土壤水分; ST: 土壤温度; BD: 容重。

Fig. 4 Principal component analysis for the effect of soil physicochemical properties on readily oxidizable carbon (ROC) in ant nests and the control soils across three forest restoration stages. A, Ant nests; B, Without ant nests. 1, *Mallotus paniculatus* community; 2, *Musa acuminata* community; 3, *Mellettia leptobotrya* community. SOC, Soil organic carbon; MBC, Microbial biomass carbon; TN, Total nitrogen; HN, Hydrolyzable nitrogen; $\text{NH}_4\text{-N}$, Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3\text{-N}$, Nitrate nitrogen; SW, Soil water; ST, Soil temperature; BD, Bulk density.

落到演替后期的崖豆藤群落, 土壤ROC含量呈上升趋势。但是, 处于演替中期的野芭蕉群落ROC含量最大, 可能是由于野芭蕉群落地处沟谷, 具有较高的土壤含水率及较多的地表凋落物, 从而有利于ROC的形成与积累(Wang et al, 2017)。

蚂蚁筑巢定居活动通过增加巢内有机物的输入、改变群落土壤环境显著增加了土壤ROC含量, 且土壤ROC的增加量在不同恢复阶段间存在差异性。王邵军等(2016)研究表明, 蚂蚁巢穴在空间上随机分布, 不同热带森林恢复阶段具有不同的蚂蚁种类、总数、巢穴密度与盖度, 可能对群落微生境、微生物及理化性质产生不同的影响, 进而影响到土壤ROC含量。作为恢复初期的白背桐群落, 由于其群落植被组成、结构及多样性简单, 群落环境容易受到干扰, 地上植物稀疏, 向土壤输入的有机物偏少(张哲等, 2019), 蚁巢的物质养分积累相对较低, 因此土壤易氧化有机碳含量较低; 随着恢复年限的

增加, 处于恢复中期的野芭蕉和恢复后期的崖豆藤群落, 其植被与环境趋于稳定与复杂, 蚁巢的养分积累相对较高, 所以土壤易氧化有机碳含量显著提升。

不同恢复阶段热带森林蚁巢与非蚁巢地土壤ROC含量均表现为6月最高、12月最低, 这与土壤温湿度的时间动态相一致。因为6月正处于西双版纳地区的雨季, 且温度较高, 能够促进土壤微生物的数量增长及活性, 有利于土壤ROC的形成(刘明慧等, 2018); 12月进入了干季, 温湿度有所降低, 土壤微生物活性变弱, 从而减缓土壤ROC的形成。土壤ROC的含量随深度增加呈减小的变化趋势, 推测与表层输入土壤总有机碳的质量密切相关(姜培坤, 2005; 王清奎等, 2005)。群落凋落物主要集中在土壤表层, 所以表层ROC在土壤总有机碳中的占比较高。然而, 相同月份或相同土层蚁巢土壤ROC含量均显著高于非蚁巢, 推测是由于蚂蚁筑巢影响了巢内温度与湿度, 能够导致有机物、蚂蚁排泄物、动物尸体、植物残渣等含碳有机物在蚁巢中的聚集(Wang et al, 2010)。

3.2 土壤温湿度对土壤易氧化有机碳的影响

土壤温度的季节变化是影响土壤ROC的重要因素(Diaz-Ravifia et al, 1995)。不同恢复阶段热带森林蚂蚁筑巢土壤均具有较高的土壤温度, 可能影响微生物的活性及数量, 进而对土壤易氧化有机碳的积累产生重要影响。蚂蚁筑巢能够维持较高的土壤温度, 这与蚁巢对太阳辐射的接受以及蚁巢内微生物的新陈代谢产热密切相关(Frouz, 2000)。蚂蚁筑巢能使土壤水分发生变化进而对土壤易氧化有机碳含量产生显著影响。本研究表明, 除野芭蕉群落外, 其他群落蚂蚁筑巢能够显著增加土壤水分($P < 0.05$)。土壤微生物主要以真菌为主, 在土壤含水量高的环境下, 真菌快速增长, 促进了对地表凋落物的快速分解, 同时也促进了真菌对碳源的分解转化, 有利于土壤易氧化有机碳的积累(鱼小军等, 2010; 陈骥等, 2013)。蚂蚁筑巢主要通过蚂蚁的呼吸、排泄、筑巢活动而增加蚁巢的湿度(陈元瑶等, 2012)。也有研究表明, 蚂蚁在搬运、取食的过程中造成了植物组织覆盖地表, 减少了水分的下渗, 从而降低了土壤水分(徐云岩等, 2016; 翟凯燕等, 2017)。因此, 蚂蚁筑巢对土壤水分及土壤ROC的影响存在一定的不确定性。

3.3 土壤容重对土壤易氧化有机碳的影响

大量研究表明, 蚂蚁通过营巢活动增加了土壤通透性(Macmahon et al, 2000), 减少了土壤容重(侯继华等, 2002)。鱼小军等(2010)对东祁连山高寒草地生态系统分析发现, 蚁巢土壤与相邻非蚁巢土壤相比, 容重下降了59%。陈骥等(2013)在青海湖北岸高寒草甸草原群落分析中也发现, 蚂蚁在筑巢的过程中挖掘土壤, 对有机物质进行搬运, 显著降低了土壤容重。本研究中, 不同恢复阶段热带森林蚂蚁筑巢显著降低了土壤容重($P < 0.05$), 并且蚁巢地土壤容重与土壤易氧化有机碳含量呈极显著负相关($P < 0.01$)。因此, 蚂蚁筑巢可能影响土壤化学组分及土壤微生物区系组成, 并改变土壤水分、温度和植物根系等, 最终对土壤易氧化有机碳含量产生重要影响。

3.4 土壤微生物对土壤易氧化有机碳的影响

土壤微生物作为土壤中最活跃的生物组成部分, 能够影响土壤易氧化有机碳的形成。本研究中, 蚂蚁筑巢显著提高了土壤微生物量碳含量, 说明蚂蚁活动显著刺激了土壤微生物的数量增长, 从而影响土壤有机碳的转化及土壤易氧化有机碳的形成(陈元瑶等, 2012)。已有研究表明, 蚁巢内土壤微生物数量及活性较高, 一方面是由于蚂蚁的粪便和排泄物在蚁巢的聚集(陈应武等, 2007); 另一方面是昆虫尸体、植物组织、蚜虫蜜露等物质在蚁巢的富集。另外, 蚂蚁筑巢和觅食活动会导致蚁巢内的微环境(如酸碱度、湿度以及土壤结构等)发生变化, 进而影响到土壤微生物的活性和丰富度(Diaz-Ravifia et al, 1995)。水分是微生物生命活动的必要条件, 土壤水分与活性有机碳显著相关(Piao et al, 2000), 水分适宜时, 微生物活动旺盛, 对凋落物等碳源的分解作用加强(Acea & Carballas, 1990)。同时, 土壤真菌在土壤含水量高的环境下快速增长, 能够刺激土壤有机质分解。因此, 蚂蚁筑巢定居能够直接或间接影响巢内土壤水分及养分条件, 并影响到土壤微生物数量及活性, 进而对土壤ROC积累产生至关重要的影响。

3.5 土壤pH变化对土壤易氧化有机碳的影响

蚂蚁筑巢引起西双版纳不同恢复阶段热带森林土壤pH值的改变, 进而影响土壤ROC含量。马和平等(2012)对西藏色季拉山不同林分的研究认为, 土壤ROC含量与pH值存在显著负相关关系。本研究

中蚂蚁筑巢显著降低了土壤pH值, 这和前人的研究结果一致(Folgarait, 1998; 梁俭, 2016), 土壤中较低的pH值可以促进土壤微生物活性, 进而有利于土壤ROC的积累。但有研究认为, 蚂蚁筑巢可使蚁巢土壤pH值趋向中性, 不利于土壤ROC的积累(Frouz et al, 2003)。因此, 蚂蚁筑巢对土壤pH值影响的过程及机制仍然十分模糊, 亟待进一步研究。

参考文献

- Acea MJ, Carballas T (1990) Principal components analysis of the soil microbial populations of humid zone of Galicia (Spain). *Soil Biology and Biochemistry*, 22, 749–759.
- Blair GJ, Lefroy RDB, Lisle L (1995) 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*, 46, 1459–1466.
- Chen J, Cao JJ, Zhang SY, Fan YL, Wang XF, Wei YL (2013) Ants' hill-building activities on the plant community structure in alpine meadow grassland in the northern Qinghai Lake, China. *Journal of Earth Environment*, 4, 1461–1469. (in Chinese with English abstract) [陈骥, 曹军骥, 张思毅, 樊云龙, 王小菲, 魏永林 (2013) 蚂蚁扰动对青海湖北岸高寒草甸草原群落结构影响. *地球环境学报*, 4, 1461–1469.]
- Chen XH, Yang QQ, Chen ZZ, Yu XB, Yang Q, Lei JR (2017) Distribution of soil easily oxidized organic carbon and its response to soil factors in the tropical coastal forest of Hainan Island, China. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 37, 140–145. (in Chinese with English abstract) [陈小花, 杨青青, 陈宗铸, 余雪标, 杨琦, 雷金睿 (2017) 海南岛热带海岸森林土壤易氧化有机碳分布规律及其对土壤因子的响应. *中南林业科技大学学报*, 37, 140–145.]
- Chen XX, Liang AZ, Zhang XP (2012) Research methods of carbon sequestration by soil aggregates: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 1999–2006. (in Chinese with English abstract) [陈晓侠, 梁爱珍, 张晓平 (2012) 土壤团聚体固碳的研究方法. *应用生态学报*, 23, 1999–2006.]
- Chen YW, Li XR, Su YG, Dou CH, Jia XH, Zhang ZS (2007) Study on the eco-functions of *Formica cunicularia* (Hymenoptera: Formicidae) in a revegetated area on the southeast fringe of Tengger Desert, North China. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 1508–1514. (in Chinese with English abstract) [陈应武, 李新荣, 苏延桂, 窦彩虹, 贾晓红, 张志山 (2007) 腾格里沙漠人工植被区掘穴蚁(*Formica cunicularia*)的生态功能. *生态学报*, 27, 1508–1514.]
- Chen YY, Wei C, He H, Wang YG (2012) Correlation of physicochemical characteristics and microbial biomass among nest soil of *Camponotus japonicus* and *Pachycondyla astute* in Qinling Mountains. *Journal of Northwest Forestry*

- University, 27, 121–126. (in Chinese with English abstract) [陈元瑶, 魏琮, 贺虹, 王云果 (2012) 秦岭地区2种蚂蚁巢内土壤理化性质和微生物量的相关性研究. 西北林学院学报, 27, 121–126.]
- Chen ZJ, Geng SC, Zhang JH, Setälä H, Gu Y, Wang F, Zhang X, Wang XX, Han SJ (2017) Addition of nitrogen enhances stability of soil organic matter in a temperate forest. *European Journal of Soil Science*, 68, 189–199.
- Diaz-Ravifia M, Acea MJ, Carballas T (1995) Seasonal changes in microbial biomass and nutrient flush in forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 19, 220–226.
- Duval ME, Galantinib JA, Martíneza JM, López FM, Wall LG (2016) Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality. *Soil & Tillage Research*, 159, 9–22.
- Folgarait PJ (1998) Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: A review. *Biodiversity & Conservation*, 7, 1221–1244.
- Folgarait PJ, Perelman S, Gorosito N, Pizzio R, Fernández J (2002) Effects of *Camponotus punctulatus* ants on plant community composition and soil properties across land-use histories. *Plant Ecology*, 163, 1–13.
- Frouz J (2000) The effect of nest moisture on daily temperature regime in the nests of *Formica polyctena* wood ants. *Insectes Sociaux*, 47, 229–235.
- Frouz J, Holec M, Kalčík J (2003) The effect of *Lasius niger* (Hymenoptera, Formicidae) ant nest on selected soil chemical properties. *Pedobiologia*, 47, 205–212.
- He H, Wei C, Wang YG, Gao ZH (2011) The fungal diversity in nests of three soil-nesting ant species (Hymenoptera: Formicidae) in pine forests of Louguantai National Forest Park, China. *Journal of Northwest Forestry University*, 26, 129–134. (in Chinese with English abstract) [贺虹, 魏琮, 王云果, 高智辉 (2011) 秦岭楼观台油松林地3种土栖性蚂蚁巢内真菌多样性研究. 西北林学院学报, 26, 129–134.]
- Holec M, Frouz J (2006) The effect of two ant species *Lasius niger* and *Lasius flavus* on soil properties in two contrasting habitats. *European Journal of Soil Biology*, 42, 213–217.
- Hou JH, Zhou DW, Jiang SC (2002) The effect of hill-building activities of ants on the species diversity of plant communities in Songnen grassland. *Acta Phytoecologica Sinica*, 26, 323–329. (in Chinese with English abstract) [侯继华, 周道玮, 姜世成 (2002) 蚂蚁筑丘活动对松嫩草地植物群落多样性的影响. 植物生态学报, 26, 323–329.]
- Jiang PK (2005) Soil active carbon pool under different types of vegetation. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(1), 10–13. (in Chinese with English abstract) [姜培坤 (2005) 不同林分下土壤活性有机碳库研究. 林业科学, 41(1), 10–13.]
- Kilpelinen J, Finér L, Niemel P, Domisch T, Neuvonen S, Ohashi M, Risch AC, Sundström L (2007) Carbon, nitrogen and phosphorus dynamics of ant mounds (*Formica rufa* group) in managed boreal forests of different successional stages. *Applied Soil Ecology*, 36, 156–163.
- Liang J (2016) The Flooding Behavior and Structure Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter in Water-Level-Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir Areas. PhD dissertation, Southwest University, Chongqing. (in Chinese with English abstract) [梁俭 (2016) 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. 博士学位论文, 西南大学, 重庆.]
- Liu MH, Sun X, Yu WJ, Qin LW, Feng FJ (2018) Seasonal dynamics of soil active organic carbon content in the original *Pinus koraiensis* forest in Changbai Mountains, China. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 42(2), 67–74. (in Chinese with English abstract) [刘明慧, 孙雪, 于文杰, 秦立武, 冯富娟 (2018) 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), 42(2), 67–74.]
- Liu RT, Zhao HL, Zhao XY (2009) Distribution of mound of *Formica cunicularia* and its affecting factors on mobile dune in Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 376–380. (in Chinese with English abstract) [刘任涛, 赵哈林, 赵学勇 (2009) 科尔沁沙地流动沙丘掘穴蚂蚁丘分布及影响因素. 应用生态学报, 20, 376–380.]
- Liu YH, Wang YH, Yu PT, Xiong W, Hao J, Zhang XB, Xu LH (2012) Soil organic carbon contents of *Larix principis-rupprechtii* plantations in the southern part of Liupan Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 48(12), 1–9. (in Chinese with English abstract) [刘延惠, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 郝佳, 张晓蓓, 徐丽宏 (2012) 六盘山南部华北落叶松人工林土壤有机碳含量. 林业科学, 48(12), 1–9.]
- Ma HP, Guo QQ, Liu HM, Qian DF (2012) Variations of soil microbial biomass and readily oxidizable organic carbon along elevation gradient in Sejila Mountain, Tibet. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26, 163–166. (in Chinese with English abstract) [马和平, 郭其强, 刘合满, 钱登锋 (2012) 西藏色季拉山土壤微生物量碳和易氧化态碳海拔梯度的变化. 水土保持学报, 26, 163–166.]
- Macmahon JA, Mull JF, Crist TO (2000) Harvester ants (*Pogonomyrmex* spp.): Their community and ecosystem influences. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 31, 265–291.
- Matías L, Castro J, Zamora R (2012) Effect of simulated climate change on soil respiration in a Mediterranean-type ecosystem: Rainfall and habitat type are more important than temperature or the soil carbon pool. *Ecosystems*, 15, 299–310.
- Piao HC, Hong YT, Yuan ZY (2000) Seasonal changes of microbial biomass carbon related to climatic factors in soils from areas of southwest China. *Biology and Fertility of Soils*, 30, 294–297.
- Tripathi N, Singha RS, Hills CD (2016) Soil carbon development in rejuvenated Indian coal mine spoil. *Ecological Engineering*, 90, 482–490.
- Wang QK, Wang SL, Feng ZW, Huang Y (2005) Active soil

organic matter and its relationship with soil quality. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 513–519. (in Chinese with English abstract) [王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 黄宇 (2005) 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. *生态学报*, 25, 513–519.]

Wang SJ, Wang H, Li JH (2016) Distribution characteristics of ant mounds and correlating factors across different succession stages of tropical forests in Xishuangbanna. *Biodiversity Science*, 24, 916–921. (in Chinese with English abstract) [王邵军, 王红, 李霁航 (2016) 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. *生物多样性*, 24, 916–921.]

Wang SJ, Wang H, Li JH, Zhang Z (2017) Ants can exert a diverse effect on soil carbon and nitrogen pools in a Xishuangbanna tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 113, 45–52.

Wang Y, Ruan HH, Huang LL, Feng YQ, Qi Y (2010) Soil labile organic carbon with different land uses in reclaimed land area from Taihu Lake. *Soil Science*, 175, 624–630.

Wo XT, Tian SY, Han LD, Shao YN, Liu YL (2014) Study on soil organic carbon under two types of vegetation in small Xing'an Mountains. *Research of Soil and Water Conservation*, 21, 13–17. (in Chinese with English abstract) [沃晓棠, 田松岩, 韩丽冬, 邵英男, 刘玉龙 (2014) 小兴安岭两种林型的土壤有机碳研究. *水土保持研究*, 21, 13–17.]

Xu YY, Gong YB, Fu WQ, Cui YX, Chen YJ, Zhang HT (2016) Effect of different reform measures on soil carbon and nitrogen characteristics and carbon stability in low efficiency forest of *Pinus massoniana* in southern Sichuan Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30, 226–230. (in Chinese with English abstract) [徐云岩, 宫渊波, 付万权, 崔亚潇, 陈耀嘉, 张海涛 (2016) 川南马尾松低效林不同改造措施对土壤碳、氮特征及其碳稳定性的影响. *水土保持学报*, 30, 226–230.]

Yang XD, She YP, Zhang ZY, Cao M, Deng XB (2001) Studies on structure and diversity of ant groups in the fragmentary tropical rainforests of 'Holy Hills' of Dai nationality in Xishuangbanna, China. *Acta Ecologica Sinica*, 21, 1321–1328. (in Chinese with English abstract) [杨效东, 余宇平, 张智英, 曹敏, 邓晓保 (2001) 西双版纳傣族“龙山”片断热带雨林蚂蚁类群结构与多样性研究. *生态学报*, 21, 1321–1328.]

Yu XJ, Pu XP, Huang SJ, Fang QE, Xu N, Xu CL (2010)

Effects of ants (*Tetramorium* sp.) on eastern Qilian Mountains alpine grassland ecosystem. *Acta Prataculturae Sinica*, 19, 140–145. (in Chinese with English abstract) [鱼小军, 蒲小鹏, 黄世杰, 方强恩, 徐宁, 徐长林 (2010) 蚂蚁对东祁连山高寒草地生态系统的影响. *草业学报*, 19, 140–145.]

Zhai KY, Ma TY, Jin XM, Yuan ZX, Chen B, Guan QW (2017) Effects of thinning intensity on soil active organic carbon in *Pinus massoniana* plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 609–615. (in Chinese with English abstract) [翟凯燕, 马婷瑶, 金雪梅, 袁在翔, 陈斌, 关庆伟 (2017) 间伐对马尾松人工林土壤活性有机碳的影响. *生态学杂志*, 36, 609–615.]

Zhang H, Huang YM, An SS, Xing XY (2013) Soil active organic carbon with different plant communities on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 20, 65–70. (in Chinese with English abstract) [张宏, 黄懿梅, 安韶山, 邢肖毅 (2013) 黄土高原森林带植被群落下土壤活性有机碳研究. *水土保持研究*, 20, 65–70.]

Zhang X, Han SJ, Wang SQ, Gu Y, Yue LY, Feng Y, Geng SC, Chen ZJ (2016) Change of soil organic carbon fractions at different successional stages of *Betula platyphylla* forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 282–289. (in Chinese with English abstract) [张雪, 韩士杰, 王树起, 谷越, 岳琳艳, 冯月, 耿世聪, 陈志杰 (2016) 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*, 35, 282–289.]

Zhang Z, Wang SJ, Li JH, Cao R, Chen MK, Li SH (2019) Response of soil readily oxidizable organic carbon to plant community recovery of Xishuangbanna tropical forests. *Acta Ecologica Sinica*, doi: 10.5846/stxb201806021230. (in Chinese with English abstract) [张哲, 王邵军, 李霁航, 曹润, 陈闽昆, 李少辉 (2019) 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林植物群落恢复的响应. *生态学报*, doi: 10.5846/stxb201806021230.]

Zhao XZ (2010) Soil Organic Carbon Pool and Turnover of Main Forest Community Type in Small Xing'an Mountains. PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. (in Chinese with English abstract) [赵溪竹 (2010) 小兴安岭主要森林群落类型土壤有机碳库及其周转. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨.]

(责任编辑: 贺纪正 责任编辑: 闫文杰)