

鹤山不同植被类型土壤惰性碳含量及其季节变化特征

习丹^{1,2}, 李炯¹, 旷远文^{1*}, 许伊敏^{1,2}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探讨植被恢复下森林土壤惰性碳(Non-labile carbon, NLC)的分布和季节动态,对鹤山 6 种不同植被类型(灌草、马尾松、桉树、乡土树种、马占相思、季风常绿阔叶林)不同土层(0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm) NLC 进行研究。结果表明: 6 种植被类型土壤 NLC 含量均以表层(0~10 cm)最高,且随土层深度增加有下降趋势。表层土壤 NLC 含量受植被类型的影响显著,马占相思林的土壤 NLC 含量显著高于其他林型;马尾松林的土壤 NLC 含量最低,与其他林型差异显著。马占相思林深层土壤(10~20 cm 和 20~40 cm)的 NLC 含量显著高于其它植被类型,其它植被类型间无显著差异。不同植被类型的土壤 NLC 含量具有不同的干湿季动态变化,湿季土壤 NLC 占土壤总有机碳(Soil organic carbon, SOC)的比值高于干季。从不同土层 NLC 占 SOC 的比例可见,马占相思林和灌草林能显著提高土壤不同层次的 NLC 含量,马尾松林、桉树林、乡土树林和季风常绿阔叶林则有利于提高深层土壤 SOC 稳定性。

关键词: 鹤山; 土壤层次; 土壤惰性碳; 土壤有机碳; 植被类型

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.03.002

Variation of Soil Non-labile Carbon under Different Forest Types in Heshan

XI Dan^{1,2}, LI Jiong¹, KUANG Yuan-wen^{1*}, XU Yi-min^{1,2}

(1. *South China Botanical Garden, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510650, China*; 2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to determine the vertical contents and the seasonal variations of none-labile carbon (NLC) under different forest types, soils samples at 0~10, 10~20 and 20~40 cm depth were collected from six forests, including shrub-grass forest, masson pine forest, *Eucalyptus* forest, native-species forest, *Acacia* forest and monsoon evergreen broad-leaved forest, respectively, in Heshan. The results showed that soil NLC declined with the soil depth in the six types of forest with the highest NLC contents at the surface layer (0~10 cm depth). At the surface layer soil, the contents of NLC were significantly different among the forest types with the highest level in *Acacia* forest and the lowest level in masson pine forest. At the deeper layers (10~20 cm and 20~40 cm depth), the *Acacia* forest had the highest NLC while the other 5 forest types had the contents of NLC without significant differences. Among the six forest types, there were seasonal patterns of soil NLC with the higher ratios of NLC to soil organic carbon (SOC) in wet season than in dry season. The ratios of NLC/SOC among the six forest types indicated that *Acacia* forest and shrub-grass forest were helpful to increase the contents of soil NLC at all layers,

收稿日期: 2012-10-29

接受日期: 2013-01-05

基金项目: 国家重大科学研究计划(2013CB956701); 国家自然科学基金面上项目(31170427); 中国科学院基础前沿研究专项(KSCX2-EW-J-28); 广东省林业科技创新专项资金项目(2010KJCX014); 广东省科技计划项目(2010B031800016)联合资助

作者简介: 习丹(1987~),女,硕士研究生,研究方向为环境生态学。E-mail: xidan2010@scbg.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kuangyw@scbg.ac.cn

while masson pine forest, *Eucalyptus* forest, native-species forest, and monsoon evergreen broad-leaved forest were helpful to stabilize the contents of SOC at deeper soils.

Key words: Heshan; Soil depth; Soil non-labile carbon; Soil organic carbon; Forest type

森林恢复和植被演替是重要的潜在碳汇^[1],对不同于干扰状态下森林的地下碳贮积和变化机制的研究已是目前全球变化的热点问题之一。森林土壤有机碳库(Soil organic carbon, SOC)是陆地碳库的主要组成部分,它由生物有效性不同的组分构成^[2],对保持土壤肥力,维持全球碳库平衡^[3-4]起着重要作用。在特定的生物、气候条件影响下,不同组分的SOC会随着森林生长达到稳定状态,表现出不同的稳定性和周转期^[5]。Parton等^[6]根据土壤SOC不同组分在土壤微生物降解过程中的稳定性差异,将土壤SOC分为活性碳(Active organic carbon, AOC)、缓效性碳(Slow organic carbon)和惰性碳库(Non-labile carbon, NLC)。尽管土壤碳库中的活性组分能将土壤的矿物质、有机质与生物成分联系在一起,反映土壤肥力和土壤物理性质的变化,指示各种有机物的矿化率和土壤的综合活力水平^[7]。但由于土壤活性碳受各种因素影响波动较大,要准确估算土壤碳库储量及收支状况,正确评价土壤在陆地生态系统碳循环的作用并预测气候变化,仅靠研究土壤AOC和土壤SOC的变化远远不够,还应考虑那些理化性质非常稳定,能持久为土壤提供养分的慢性碳(如NLC)。而现有的研究^[8-11]主要是依据三库遵循一级动力学方程(First-order kinetics with the equation)理论上拟合出土壤不同碳库大小、驻留时间、分解速率等方面。

退化生态系统在植被恢复过程中,由于各种影响因素都会发生变化,土壤碳库及其碳形态随时间推移出现不同,这些差别将对森林土壤碳收支平衡产生影响^[12]。近年来,我国人工林面积不断增加,人工林在我国陆地森林生态系统碳收支中的作用日趋显著,但在很多大规模人工林营造过程中,由于缺乏对森林土壤碳库固持机理的了解,并没有过多考虑和强化土壤碳汇功能的因素。因此,本文选择南亚热带鹤山植被恢复过程中的6种植被类型(灌草、马尾松、桉树、马占相思、乡土树种荷木林和季风常绿阔叶林)土壤为研究对象,分析土壤的NLC含量变化特征及其季节变化规律,以期为退化生态系统恢复过程中合理营建高效固碳人工林、提升森林土壤碳蓄积能力提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院鹤山森林生态系统国家野外科学观测研究站(简称鹤山站),地理位置为22°41' N, 112°54' E,属广东省南亚热带粤中丘陵区,是典型的南亚热带季风气候,有明显的干湿季节交替。年平均气温为21.7℃,最热月均温为29.2℃,最冷月均温为12.6℃,极端最高温度达37.5℃,极端最低温度为0℃。年平均≥10℃的有效积温为7597℃,年均降水量为1700 mm,年均蒸发量达1600 mm^[12]。丘陵地土壤为赤红壤,呈酸性。早期受人为干扰严重,许多地区退化为荒坡地;自1984年起,鹤山站先后营造了多种人工林,进行植被恢复研究并构建林、果、草、渔复合农业生态系统示范模式^[12]。本研究的6种植被类型基本情况如下:

(1) 灌草林(Shrub-grass forest, SF):主要优势种为芒萁(*Dicranopteris pedata*)及一些小灌木;

(2) 马占相思林(*Acacia* forest, AF):林龄有25年以上,林分乔木层盖度为40%~60%;平均胸径达20~25 cm,地表凋落物较多,植物种类主要有竹节树(*Carallia brachiata*)、白车(*Syzygium levinei*)、黑咀蒲桃(*Syzygium cumini*)等;

(3) 桉树林(*Eucalyptus* forest, EF):树高15 m以上,郁闭度为15%~30%,林下植被较丰富,有红车(*Syzygium hancei*)、浓子茉莉(*Fagerlindia scandens*)、紫玉盘(*Uvaria microcarpa*)等;

(4) 马尾松林(Massion pine forest, PF):主要是马尾松(*Pinus massoniana*)人工林,林龄达28年以上,平均胸径为20~30 cm,马尾松盖度为25%~35%,林下植被有豹皮樟(*Litsea rotundifolia*)、银柴(*Aporosa dioica*)、阴香(*Cinnamomum burmanni*)、九节(*Psychotria rubra*)等;

(5) 乡土树种林(Native-species forest, NF):主要以荷木(*Schima superba*)为主,伴生有九节(*Psychotria rubra*)、银柴(*Aporosa dioica*)、潺槁木姜子(*Litsea glutinosa*)等;

(6) 季风常绿阔叶林(Monsoon evergreen broad-leaved forest, MF):森林郁闭度达85%以上,林下灌木与草本植物种类较少,地表凋落物量较高。

1.2 土壤样品的采集、处理及分析

从鹤山站选取具有代表性且立地条件相似的6种不同植被类型样地,在样地中进行土样采集。每种植被类型根据样地分布走势分上、中、下3个坡位,用内径2 cm、长1 m的土钻分0~10、10~20、20~40 cm土层采集土样。在各林型样地不同坡位,分别随机采集8~10管土样,混合成1个土样,每个样地有3个混合土样。土样采集后,带回实验室自然风干,挑去根系和石砾,粉碎,过2 mm筛干燥保存,备分析。土壤取样时间分别是2011年8月(代表湿季)和2012年2月(代表干季)。

土壤SOC测定采用 $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 油浴外加热法^[13]。土壤NLC测定采用酸水解法^[14-15]。具体步骤为:称取2.0000 g过2 mm筛的土样于消煮管中,缓慢加入5 mL 6 mol L⁻¹ HCl溶液,并小心旋转摇匀,盖上小漏斗,置于消煮炉中,待炉中温度至125℃时消煮16 h,消煮完后取出消煮管,待样品冷却,用蒸馏水反复冲洗样品,直至无盐酸存在,过滤,放入50℃烘箱中烘干,烘干好的土样研磨过180目土壤筛,最后采用SOC法测得的有机碳即为NLC。

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel和SPSS 16.0软件进行数据处理和统计分析。差异显著性采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验;采用Sigmaplot 11.0

软件绘图。

2 结果和分析

2.1 土壤NLC含量的垂直变化

不同植被类型下土壤NLC干湿季平均含量随土壤深度的变化规律见图1。在6种植被类型中,土壤NLC平均含量均表现出相似的变化规律:0~10 cm土壤的NLC含量(9.13~27.48 g kg⁻¹)均显著高于深层土壤,10~20 cm和20~40 cm土壤NLC的平均含量虽然呈下降趋势,但下降幅度均不显著。6种植被类型深层土壤(10~20 cm和20~40 cm)NLC的平均含量与表土层相比,其降幅均达到70%以上,其中降幅最大的是马占相思林(80.8%),最小的为马尾松林(70.1%)。

2.2 不同植被土壤NLC含量的比较

土层NLC平均含量因地地上植被的不同存在差异,以表土层尤为明显(图1)。6种植被中表土层NLC平均含量最高的是马占相思人工林,达到(27.48 ± 3.23) g kg⁻¹,显著高于其它5种植被类型,最低为马尾松人工林[(9.13 ± 1.85) g kg⁻¹]。统计显示,桉树林[(15.88 ± 2.36) g kg⁻¹]、常绿阔叶林[(15.72 ± 2.71) g kg⁻¹]、灌草[(15.04 ± 2.08) g kg⁻¹]和乡土树林[(11.09 ± 3.23) g kg⁻¹]表土层的NLC无显

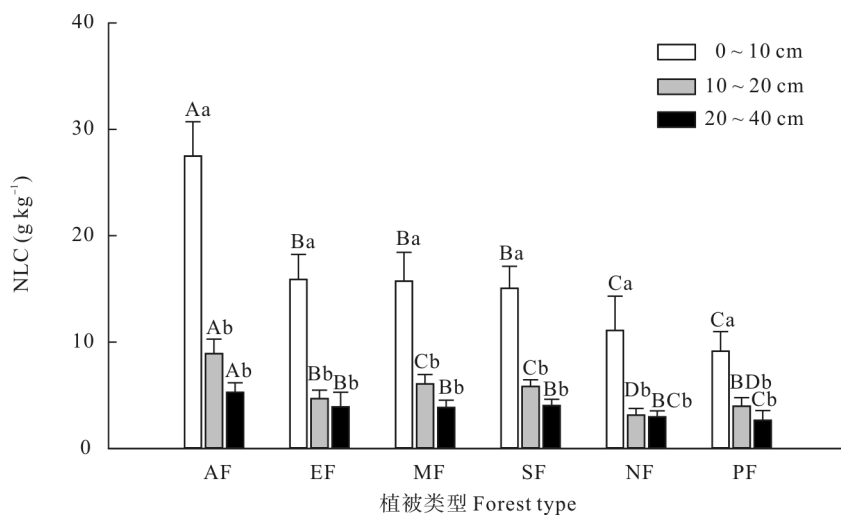


图1 不同植被类型下不同层次土壤NLC含量。同一土层柱上不同大写字母和同一植被柱上不同小写字母表示显著差异(P < 0.05)。AF: 马占相思林; EF: 桉树林; MF: 季风常绿阔叶林; SF: 灌草林; NF: 乡土树种林; PF: 马尾松林。

Fig. 1 Content of the soil non-labile carbon (NLC) among the soil layers under different forest types. Different capital and small letters above column of the same soil layer and the same forest indicate significant difference at 0.05 level. AF: *Acacia* forest; EF: *Eucalyptus* forest; MF: Monsoon evergreen broad-leaved forest; SF: Shrub-grass forest; NF: Native-species forest; PF: Massion pine forest.

著差异,马尾松林表土层的 NLC 则显著低于其它植被类型($P < 0.05$)。比较分析表明,6种植被类型下 10~20 cm 土层的平均 NLC 含量,马占相思林(约为 9.0 g kg^{-1})仍显著高于其它 5 种植被类型,常绿阔叶林和灌草林含量相近(约为 6.0 g kg^{-1}),桉树林、乡土树林和马尾松林含量最低(约为 4.0 g kg^{-1})。在 20~40 cm 土层,土壤的平均 NLC 含量最高的仍是马占相思林[$(5.28 \pm 0.89) \text{ g kg}^{-1}$],其余 5 种植被类型的平均 NLC 含量(约为 3.5 g kg^{-1})无显著差异($P > 0.05$)。不论哪个土层,马占相思林的土壤 NLC 平均含量都显著高于其它 3 种人工林。3 种人工先锋林中,表层和底层土壤 NLC 含量都是桉树林 > 乡土树种林 > 马尾松林,而在 10~20 cm 土层处则是桉树林 > 马尾松林 > 乡土树种林。

2.3 同一植被下不同土层土壤 NLC 的干湿季变化

同一植被不同土层土壤 NLC 含量在干湿季出现不同的变化特征(图 2)。如灌草林下,湿季 0~10 cm 和 20~40 cm 土层的 NLC 含量要低于干季,而在季风常绿阔叶林下,这两层土壤的 NLC 含量

却表现出湿季显著高于干季的特征;即使在 4 种人工林先锋树种下,不同土层 NLC 在干湿季的变化规律也存在不一致性:马占相思林表土层 NLC 含量表现为湿季显著小于干季,桉树林表土层 NLC 含量则是湿季显著高于干季,乡土树林和马尾松林表土层 NLC 含量在干湿季节没有显著差异。

不同土层 NLC 含量的变化对干湿季转换的敏感性也不一样。相对而言,表土层的 NLC 含量对季节的变化更为敏感,深层土壤 NLC 含量在干湿季的变化要明显小于上层土壤。值得注意的是,选择的 6 种植被类型中,底层土壤的 NLC 含量仅是灌草群落出现了从湿季到干季的上升趋势,其余 5 种植被类型则保持稳定或轻微下降状态,显示了森林植被对保持深层土壤 NLC 储量的生态效能。

2.4 不同植被下相同土层 NLC 的干湿季比较

在不同植被影响下,同一土层的 NLC 含量在湿季和干季表现各异(表 1)。在湿季,6 种植被类型的表土层 NLC 含量表现出明显的梯度变化:含量最高的是马占相思林,其次是桉树林、季风常绿

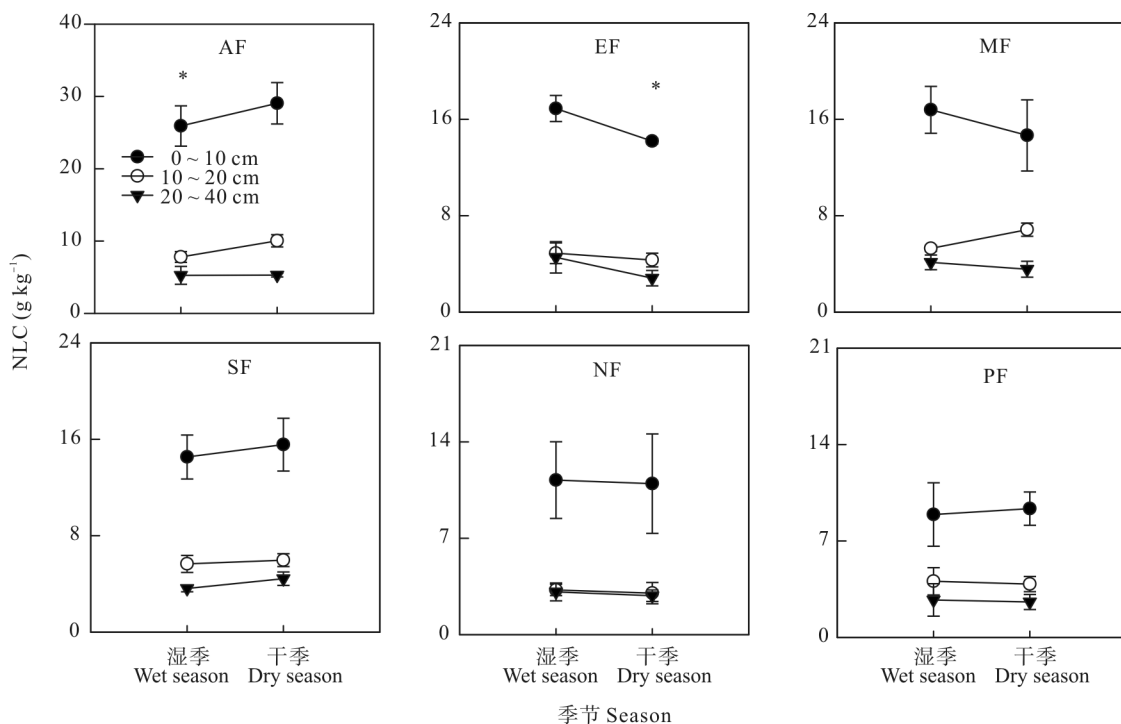


图 2 同一植被下不同土层土壤 NLC 平均含量的干湿季变化。AF: 马占相思林; EF: 桉树林; MF: 季风常绿阔叶林; SF: 灌草林; NF: 乡土树种林; PF: 马尾松林。*: 表土层(0~10 cm)上显著差异($P < 0.05$)。

Fig. 2 Seasonal changes in soil NLC content at different soil layers under the same forest type. AF: *Acacia* forest; EF: *Eucalyptus* forest; MF: Monsoon evergreen broad-leaved forest; SF: Shrub-grass forest; NF: Native-species forest; PF: Mansion pine forest. * indicate significant difference at the surface layer (0–10 cm depth) at 0.05 level.

表 1 相同土层不同植被类型的土壤 NLC 含量(g kg^{-1}) 的干湿季比较Table 1 Soil NLC content (g kg^{-1}) at the same layer in wet and dry seasons under different forest types

| 季节 Season | 植被类型 Forest type | 土层深度 Soil depth (cm) | | |
|---------------|------------------------------|----------------------|---------------|--------------|
| | | 0~10 | 10~20 | 20~40 |
| 湿季 Wet season | 马占相思林 <i>Acacia</i> forest | 25.92 ± 2.79a | 7.79 ± 0.74a | 5.26 ± 1.24a |
| | 桉树林 <i>Eucalyptus</i> forest | 16.90 ± 1.08b | 4.89 ± 0.86b | 4.55 ± 1.30a |
| | 阔叶林 Broad-leaved forest | 16.79 ± 1.94b | 5.29 ± 0.25b | 4.13 ± 0.61a |
| | 灌草林 Shrub-grass forest | 14.53 ± 1.82b | 5.66 ± 0.71b | 3.62 ± 0.28a |
| | 乡土树种林 Native-species forest | 11.22 ± 2.79c | 3.25 ± 0.41c | 3.11 ± 0.65a |
| | 马尾松林 Masson pine forest | 8.92 ± 2.30d | 4.07 ± 0.99c | 2.72 ± 1.18a |
| 干季 Dry season | 马占相思林 <i>Acacia</i> forest | 29.05 ± 2.86a | 10.03 ± 0.85a | 5.29 ± 0.25a |
| | 桉树林 <i>Eucalyptus</i> forest | 14.19 ± 0.23bc | 4.32 ± 0.57b | 2.82 ± 0.64b |
| | 阔叶林 Broad-leaved forest | 14.66 ± 2.95bc | 6.85 ± 0.55a | 3.56 ± 0.66b |
| | 灌草林 Shrub-grass forest | 15.56 ± 2.19b | 5.97 ± 0.53b | 4.43 ± 0.55a |
| | 乡土树种林 Native-species forest | 10.97 ± 3.61bc | 3.02 ± 0.77b | 2.83 ± 0.42b |
| | 马尾松林 Masson pine forest | 9.35 ± 1.21c | 3.87 ± 0.56b | 2.57 ± 0.55b |

同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Date followed different small letters within column indicate significant differences at 0.05 level.

阔叶林和灌草林,接着是乡土树种林,含量最低的是马尾松林,4种人工先锋树种林之间的差异显著(马占相思林 > 桉树林 > 乡土树林 > 马尾松林)。在 10~20 cm 土层,6种植被类型土壤 NLC 含量表现为 3 个梯度:马占相思林 > 桉树林、季风常绿阔叶林、灌草林 > 乡土林、马尾松林,梯度之间差异显著,乡土树种与马尾松林之间差异不显著。在更深层土壤中, NLC 平均含量在不同植被类型间无显著差异。在干季,相同土层的 NLC 含量特征与湿季略有不同:在 0~10 cm 土层,6种植被类型的土壤 NLC 含量表现为 3 个梯度:马占相思林仍显著高于其余 5 种植被,灌草林群落显著高于马尾松林,其余植被类型间差别不显著,4种人工先锋树种林表现为:马占相思林 > 桉树林、乡土树种和马尾松林。10~20 cm 和 20~40 cm 土层,6种植被类型间的土壤 NLC 含量呈现不同的两个梯度:10~20 cm 土层是马占相思林、季风常绿阔叶林 > 桉树林、灌草林、乡土树种林和马尾松林;20~40 cm 土层是马占相思林、灌草林 > 桉树林、季风常绿阔叶林、乡土树种林和马尾松林,两个梯度之间差异显著。

2.5 NLC 占土壤 SOC 的比例

不同植被类型下,土壤 NLC 含量占土壤 SOC

含量的比值见表 2。在 0~10 cm 土层,不同植被之间 NLC 占 SOC 比值存在显著差异,表现为马占相思林 > 灌草林 > 桉树林 > 季风常绿阔叶林 > 乡土树种林 > 马尾松林。马占相思林、桉树林和灌草林表层土壤 NLC 占土壤 SOC 总量的 70% 以上;与土壤 NLC 含量不同,灌草林群落土壤 NLC 占土壤 SOC 的比值甚至超过了季风常绿阔叶林;马尾松人工林最低。就同种植被类型而言, NLC 与 SOC 的比值出现 3 种模式,即①随土层深度加深而呈小幅度下降的趋势,如马占相思林、灌草林;②随土层深度增加先上升再降低,但高于表层土壤,如马尾松林;③随土层深度增加先降低然后又上升但低于表层土壤,如桉树林、季风常绿阔叶林、乡土树种林。桉树林和乡土树种林表层土壤的 NLC 与 SOC 比值均与中层土壤的(10~20 cm)差异显著,此外,桉树林表层土壤还与底层土壤(20~40 cm)差异显著,其他植被类型的 NLC 与 SOC 的比值在土层间无明显变化。以上表明,在植被存在的情况下,深层土壤累积的 SOC 主要是以 NLC 为主。

在干湿季交替变化中,土壤 NLC 与 SOC 的比值变化(图 3)趋势与土壤 NLC 含量随季节变化趋势(图 2)基本一致。只有马尾松人工林表层和 10~20 cm 土层土壤湿季的 NLC 与 SOC 比值低于干季。

表2 不同植被下土壤 NLC 与土壤 SOC 比值(%)

Table 2 Ratios (%) of soil NLC to SOC under different forest types

| 植被类型 Forest type | 土层深度 Soil depth (cm) | | |
|------------------------------|----------------------|------------------|------------------|
| | 0 ~ 10 | 10 ~ 20 | 20 ~ 40 |
| 马占相思林 <i>Acacia</i> forest | 74.57 ± 6.06A a | 65.75 ± 6.72A a | 63.64 ± 12.02A a |
| 桉树林 <i>Eucalyptus</i> forest | 70.29 ± 10.11A ab | 48.29 ± 10.33B b | 50.16 ± 15.01B a |
| 阔叶林 Broad-leaved forest | 61.04 ± 14.88A ab | 43.24 ± 6.47A b | 53.71 ± 18.71A a |
| 灌草林 Shrub-grass forest | 72.35 ± 15.48A a | 63.18 ± 15.19A a | 62.44 ± 16.12A a |
| 乡土树种林 Native-species forest | 57.07 ± 13.17A bc | 36.94 ± 5.41B b | 46.77 ± 8.17AB a |
| 马尾松林 Masson pine forest | 43.53 ± 5.39A c | 55.93 ± 17.74A a | 49.77 ± 15.98A a |

数据后两列不同字母分别表示在同行和同列内差异显著($P < 0.05$)。

Date followed different letters indicate significant difference at 0.05 level, the first row for the same line, and the second for the same column.

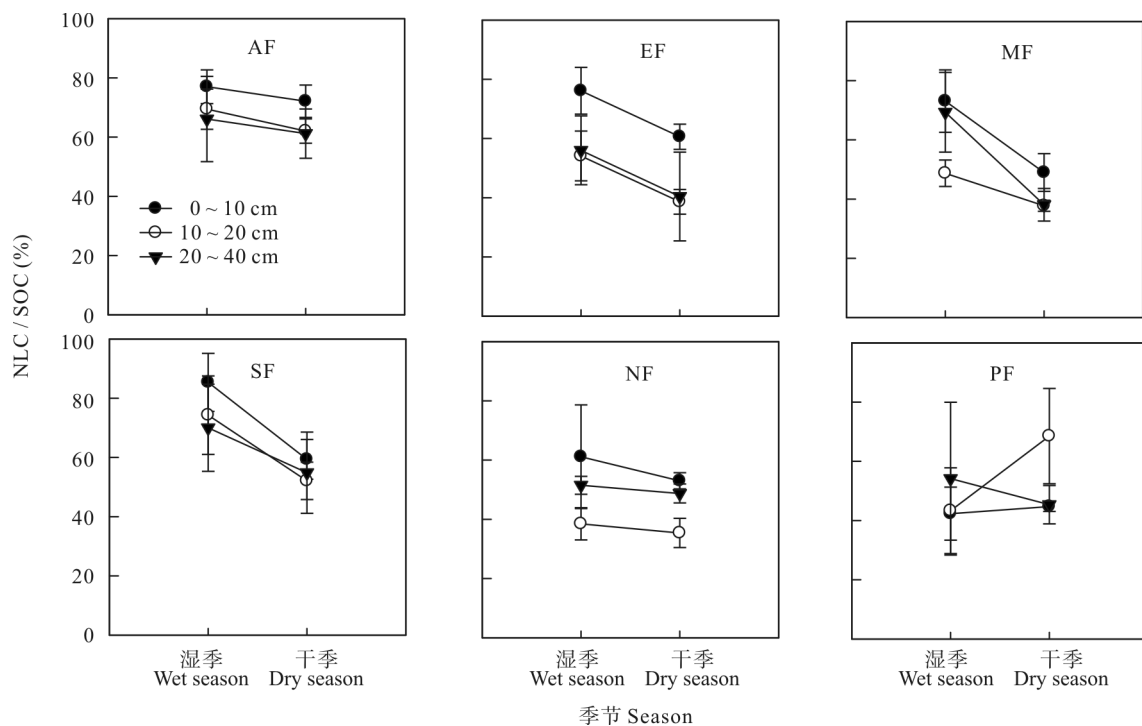


图3 不同植被下 NLC 占 SOC 的比值(%)在干湿季的变化。AF: 马占相思林; EF: 桉树林; MF: 季风常绿阔叶林; SF: 灌草林; NF: 乡土树种林; PF: 马尾松林。

Fig. 3 Ratios of soil NLC to SOC between dry and wet season under different forest types. AF: *Acacia* forest; EF: *Eucalyptus* forest; MF: Monsoon evergreen broad-leaved forest; SF: Shrub-grass forest; NF: Native-species forest; PF: Masson pine forest.

马尾松林 20 ~ 40 cm 土层和其他植被类型各层土壤均是湿季的 NLC 与 SOC 比值高于干季。

3 结论和讨论

植被通过改变群落的水热环境从而影响土壤的形成和发育, 树木生长、凋落物的输入、有机质的分解、根系分泌物等生物化学过程都能改善土壤理

化性质^[16]。在植被恢复过程中, 植被群落的差异及其地上生物量的变化, 会导致地下根系生物量和土壤碳储量发生相应改变^[17]。土壤 NLC 作为土壤碳库的一部分, 其变化也势必会直接或间接影响植被恢复过程中土壤理化性质及土壤肥力的改变。本研究结果表明, 土壤 NLC 含量在不同层次土壤的分布规律大致相同: 不论何种植被类型下, 随着土层深度的增加, 土壤 NLC 含量表现出递减

的趋势,上层土壤 NLC 含量下降的速度要快于深层土壤的下降速度。这与小兴安岭阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林土壤 NLC 含量随土层加深而降低的趋势相似^[11]。出现这种变化趋势的主要原因可能在于:凋落物的分解对浅层土壤的影响较大,根系的垂直分布直接影响输入到土壤各个层次的 NLC 数量、随土层深度的增加分解者的活动减弱,导致植物碎屑在土壤中的位置越深,其分解也越慢^[18]。植被生长及其产生的凋落物等增加了土壤 SOC 含量,从而使 NLC 储量获得增长,而这种影响在浅层土壤中表现得更为明显。这是由于表层土壤与其他土层相比,其温度、水分适宜,有利于微生物活动,加速凋落物分解,增加有机碳含量^[19]。

在自然条件下,土壤中植被残体的进入量是由森林群落类型决定的。群落类型不同,有机物的进入量也就不同,土壤有机碳的分布也有很大差异。已有的研究表明,植被类型对土壤 AOC 含量有显著的影响^[20]。依此类推,植被类型是否也会对土壤 NLC 含量产生影响呢? 本研究结果表明,无论表层还是中层或底层土壤 NLC 含量,在所选择的 6 种植被类型中都有不同程度的显著差异(图 1)。土壤 NLC 占土壤 SOC 的比值也显示在不同植被类型间也存在差异性(表 2)。这就表明植被类型确实会对土壤 NLC 含量有显著影响。研究结果还表明,马占相思林土壤 NLC 含量均显著大于其它的植被类型(图 1),其占土壤 SOC 的比值也较大(表 2)。其可能原因在于:①马占相思林主要是豆科树种,具有固氮能力,而且林下植被种类繁多,地被凋落物较多,能改善土壤养分状况,加速土壤碳、氮等元素的循环过程,从而有利于碳的积累;②不同森林植被下,不同土壤剖面上的土壤活性碳、缓效性碳库和 NLC 的库容和分解速率不同。如不同林龄人工杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林的土壤活性碳含量一般占 SOC 总量的 0.99%~2.89%,缓效性碳为 17.17%~55.46%,而 NLC 则达到 42.05%~80.66%^[21];阔叶红松林土壤表层的 NLC 占 SOC 比例则为 50.72%~76.24%,浅层土壤为 45.67%~67.83%^[11],而且刘谨等^[10]报道,在鹤山乡土树-荷木林表土层(0~10 cm)的土壤易分解碳库最大,马占相思林土壤易分解碳库最小,豆科植物马占相思林土壤的 TOC 含量要显著高于非豆科人工林(荷木)。本研究结果表明,马占相思林对土壤 NLC 储量的增加有十分显著的影响,证实了刘谨等^[10]提出的马

占相思林能有效增加土壤 TOC 的结论。由于 NLC 分解非常缓慢,土壤 NLC 及其与占土壤 SOC 的比值能反映土壤碳库稳定程度。在一定变化范围内,土壤 SOC 中 NLC 的百分比越高,说明土壤碳库越稳定。在本研究中,所有植被类型下表层土壤 NLC 占土壤 SOC 的比例均高于深层土壤,说明不同植被的凋落物中含有较多难分解的复杂化合物,使土壤的 SOC 主要以增加 NLC 为主,即植被的存在使表层土壤 SOC 稳定性增强。因此,在亚热带地区建造马占相思林能大幅提升土壤 NLC 含量,对增加土壤有机碳库有显著的作用,而种植桉树林、乡土树种林、马尾松林和保护次生阔叶林,则能有效增加深层土壤 SOC 的稳定性。

土壤在形成发育过程中不仅受植被生长的影响,还与温度、水分、降雨等气候因素有关。在本研究中,6 种植被类型下,表层土壤 NLC 含量呈现出不同的干湿季动态变化格局:灌草林群落和马占相思林的 NLC 含量在湿季显著小于干季,季风常绿阔叶林和桉树林表现为湿季显著高于干季的特征,而乡土树种林和马尾松林在干湿季的差异不明显(图 2);即使是同一季节不同植被类型间土壤 NLC 含量都表现出不同的差异性(表 1),证实了土壤 NLC 季节动态特征与植被类型特异性之间的关联。如,桉树林郁闭度不高,但林下植被丰富;季风常绿阔叶林林下郁闭度高达 80%,林下水汽充足,两者凋落物量都比较大且易分解,在生长过程中较其它植物对土壤水分、养分需求量大,在湿季其生长速度高于其它植被类型,尽管生长过程会消耗有机质,但进入土壤的 SOC 多于分解的,而且土壤 NLC 占 SOC 比值大(图 3),都表明湿季有利于 NLC 的积累;灌草林与其他林型相比,灌草林大多以小灌木、杂草为主,稳定性低,光照、土壤温度、相对湿度、气温等波动性较大,不同时期植被间对土壤养分的竞争都较大,就有可能出现表层和底层土壤 NLC 含量在干季高于湿季。总之,不同植被类型由于根系分布范围和复杂程度不同,由此造成土壤生物数量、种类活性及土壤水热条件的差异,引起土壤养分结构发生改变,使不同植被不同层次土壤 NLC 含量呈现不同的季节波动。

参考文献

- [1] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.

- [2] Ellert B H, Gregorich E G. Management-induced changes in the actively cycling fractions of soil organic matter [M]// McFee W W, Kelly J M. Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1995: 119–138.
- [3] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance [J]. *Plant Soil*, 1993, 156(1): 399–402.
- [4] Zhu Z J, Jiang P K, Xu Q F. Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation [J]. *For Res*, 2006, 19(4): 523–526.
朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较 [J]. *林业科学研究*, 2006, 19(4): 523–526.
- [5] Perruchoud D, Joss F, Fischlin A, et al. Evaluating time scales of carbon turnover in temperate forest soils with radiocarbon data [J]. *Glob Biogeochem Cycl*, 1999, 13(2): 555–573.
- [6] Parton W J, Sandford J R L, Sanchez P A, et al. Modeling soil organic matter dynamics in tropical soils [M]// Coleman D C, Oades J M, Uehara G. Dynamics of Soil Organic Matter in Tropic Ecosystems. Hawaii: University of Hawaii, 1989: 125–152.
- [7] Liu S X, Liu J S, Zhao M D, et al. Relationship between active soil organic carbon, nutrient bioavailability and crop yield [J]. *J Jilin Agri Univ*, 2003, 25(5): 539–543.
刘淑霞, 刘景双, 赵明东, 等. 土壤活性有机碳与养分有效性及作物产量的关系 [J]. *吉林农业大学学报*, 2003, 25(5): 539–543.
- [8] Paul E A, Harris D, Collins H P, et al. Evolution of CO_2 and soil carbon dynamics in biologically managed, row-crop agroecosystems [J]. *Appl Soil Ecol*, 1999, 11(1): 53–65.
- [9] Zhou Y. Soil organic carbon pools and the characteristics of carbon mineralization along an elevation gradient in Wuyi Mountain, China [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009: 1–162.
周炎. 武夷山不同海拔土壤有机碳库及其矿化特征 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009: 1–162.
- [10] Liu J, Sun Y X, Wang F M, et al. Carbon stock and TOC stability in soils of four typical plantations in South China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2010, 18(6): 607–612.
刘谨, 孙毓鑫, 王法明, 等. 华南典型人工林土壤有机碳库及其稳定性特征研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(6): 607–612.
- [11] Zhao X Z. Soil organic carbon pool and turnover of main forest community type in Xiaoxing'an Mountains [D]. Heilongjiang: Northeast Forestry Univ, 2010: 1–81.
赵溪竹. 小兴安岭主要森林群落类型土壤有机碳库及其周转 [D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2010: 1–81.
- [12] Li Y L, Peng S L, Zhao P, et al. A study on the soil carbon storage of some land use types in Heshan, Guangdong, China [J]. *J Mount Sci*, 2002, 20(5): 548–552.
李跃林, 彭少麟, 赵平, 等. 鹤山几种不同土地利用方式的土壤碳储量研究 [J]. *山地学报*, 2002, 20(5): 548–552.
- [13] Liu G S, Jiang N H, Zhang L D, et al. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 166–167.
刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 等. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 166–167.
- [14] Collins H P, Elliott E T, Pustian K, et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(2): 157–168.
- [15] Leavitt S W, Follett R F, Paul E A. Estimation of the slow and fast cycling soil organic carbon pools from 6 N HCl hydrolysis [J]. *Radiocarbon*, 1996, 38(2): 230–231.
- [16] Ouyang X J, Huang Z L, Zhou G Y, et al. Accumulative effects of forest community succession on soil chemical properties in Dinghushan of tropical China [J]. *J Soil Water Conserv*, 2003, 17(4): 51–54.
欧阳学军, 黄忠良, 周国逸, 等. 鼎湖山南亚热带森林群落演替对土壤化学性质影响的累积效应研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 51–54.
- [17] Yang L Y, Luo T X, Wu S T. Root biomass and underground C and N storage of primitive Korean pine and broad-leaved climax forest in Changbai Mountains at its different succession stages [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(7): 1195–1199.
杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛. 长白山原始阔叶红松林不同演替阶段地下生物量与碳、氮贮量的比较 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1195–1199.
- [18] Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon [J]. *Adv Earth Sci*, 2005, 20(1): 99–105.
周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99–105.
- [19] Wang C T, Long R J, Liu W, et al. Relationships between soil carbon distribution and species diversity and community biomass at different alpine meadows [J]. *Resour Sci*, 2010, 32(10): 2022–2027.
王长庭, 龙瑞军, 刘伟, 等. 高寒草甸不同群落类型土壤碳分布与物种多样性、生物量关系 [J]. *资源科学*, 2010, 32(10): 2022–2027.
- [20] Zhang J, Wang S L, Wang Q K, et al. Content and seasonal change in soil labile organic carbon under different forest covers [J]. *Chin J Eco-Agri*, 2009, 17(1): 41–47.
张剑, 汪思龙, 王清奎, 等. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化 [J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 41–47.
- [21] Shao Y H, Pan J J, Sun B. Study on characteristics of soil organic carbon decompositions and carbon pool under different vegetations [J]. *J Soil Water Conserv*, 2005, 19(3): 24–28.
邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 24–28.