

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201901056

滕秋梅, 沈育伊, 徐广平, 等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤碳库管理指数和碳组分的变化特征 [J]. 广西植物, 2020, 40(8): 1111-1122.

TENG QM, SHEN YY, XU GP, et al. Characteristics of soil carbon pool management index and carbon components of *Eucalyptus* plantations with different ages at North Guangxi [J]. *Guihaia*, 2020, 40(8): 1111-1122.

桂北不同林龄桉树人工林土壤碳库管理指数和碳组分的变化特征

滕秋梅¹, 沈育伊², 徐广平^{1*}, 黄玉清³, 张中峰¹,
张德楠¹, 周龙武¹, 孙英杰¹, 黄科朝¹, 何文¹

(1. 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西壮族自治区广西植物研究所, 广西 桂林 541006; 2. 广西植物功能物质研究与利用重点实验室, 广西壮族自治区广西植物研究所, 广西 桂林 541006; 3. 广西北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室和广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西师范学院, 南宁 530001)

摘要: 采用时空互代法,以广西北部低山丘陵地区不同林龄(1、2、3、4、5和8 a)桉树人工林为研究对象,探讨林龄对桉树人工林地土壤碳库管理指数的影响及其规律。结果表明:(1)随着林龄的增加,土壤有机碳总体表现为增加的趋势,1~8 a桉树土壤有机碳范围在5.79~15.57 g·kg⁻¹之间,随着土层的加深而降低;0~40 cm土层土壤有机碳平均含量表现为8 a>5 a>3 a>4 a>2 a>1 a。(2)土壤非活性有机碳、碳储量随林龄和土层的变化规律与土壤有机碳基本一致。土壤活性有机碳含量大小依次表现为8 a>5 a>4 a>3 a>2 a>1 a,占土壤有机碳的比例随林龄变化无明显规律,8 a和其他林龄间均具有显著差异。(3)碳库管理指数随林龄增加整体呈上升趋势,8 a桉树人工林土壤碳组分含量及碳库管理指数均高于10 a对照马尾松林。碳库管理指数与土壤有机碳、非活性有机碳、活性有机碳、碳储量、碳库活性、全氮、容重呈极显著或显著的相关性,不同林龄和土层间碳库管理指数有差异性。适当延长桉树人工林的轮伐周期,减少人为对林地凋落物和林下植被的干扰,将有利于提高土壤的有机碳含量,进而改善土壤质量。

关键词: 桉树人工林, 林龄, 土壤有机碳, 土壤活性有机碳库, 碳库管理指数

中图分类号: Q948 文献标识码: A

文章编号: 1000-3142(2020)08-1111-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



收稿日期: 2019-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(31760162,41361057);广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金(17-259-23);广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA050069,2017GXNSFBA198037);广西科技攻关计划(桂科攻1598016-12);广西科技重大专项(桂科AA17204087-9,桂科AA18118011-4);广西植物研究所基本业务费项目(17012,18007,18015) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31760162, 41361057); Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain (17-259-23); Natural Science Foundation of Guangxi (2018GXNSFAA050069, 2017GXNSFBA198037); Science and Technology Program of Guangxi (1598016-12); Science and Technology Major Project of Guangxi (AA17204087-9, AA18118011-4); Fundamental Research Fund of Guangxi Institute of Botany (17102, 18007, 18015)]。

作者简介: 滕秋梅(1991-),女,广西灵山人,硕士,研究实习员,主要从事森林生态学研究,(E-mail) 1037014105@qq.com。

***通信作者:** 徐广平,博士,副研究员,主要从事土壤生态学与全球变化的研究,(E-mail) xugpgau@163.com。

Characteristics of soil carbon pool management index and carbon components of *Eucalyptus* plantations with different ages at North Guangxi

TENG Qiumei¹, SHEN Yuyi², XU Guangping^{1*}, HUANG Yuqing³, ZHANG Zhongfeng¹, ZHANG Denan¹, ZHOU longwu¹, SUN Yingjie¹, HUANG Kechao¹, HE Wen¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Functional Phytochemicals Research and Utilization, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China; 3. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf & Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China)

Abstract: Using the space-time intergenerational method, the plantation of different ages of *Eucalyptus* plantations in low hilly areas at Northern Guangxi were taken as the research object. The effects of forest age on characteristics of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), soil labile organic carbon (LOC) and soil carbon management index (CPMI) were measured in this study. The results were as follows: (1) SOC indicated a trend of increasing with the increase of *Eucalyptus* forest age, and decreased with the increasing of soil depth. The content of soil organic carbon of 1–8 years old *Eucalyptus* varied from 5.79 to 15.57 g · kg⁻¹ in the whole soil layer (0–40 cm), the order of SOC contents was 8 a>5 a>3 a>4 a>2 a>1 a. (2) The variation tendencies of soil not labile organic carbon and carbon storage were consistent with the content of SOC. The order of soil labile organic matter contents was 8 a>5 a>4 a>3 a>2 a>1 a, respectively. There were no obvious change characteristics for the proportion of soil labile organic carbon to soil organic carbon with the increase of forest age. There was significant difference between 8 year old forest age and other forest ages. (3) The carbon pool management index increased with the increase of forest age. The soil carbon pool management index and soil carbon component contents of 8 ywars old *Eucalyptus* had been higher compared with 10 years old *Pinus massoniana* forest. Moreover, correlation analysis showed that existing extremely significant or significant correlation to soil organic carbon, soil not labile organic carbon, labile organic carbon, carbon storage, carbon pool activity, total nitrogen, bulk density and soil carbon pool management index. There were also differences of carbon pool management index between different forest ages and soil layers. It was concluded that under the condition of local soil fertility, 8 years old *Eucalyptus* could both increase SOC contents and improve CPMI, favor soil quality amelioration and soil fertility improvement. Therefore, extending *Eucalyptus* plantations forest harvesting time and decreasing the disturbance to forest litter and understory vegetation would improve soil quality, and it is also important for promoting sustainable development of *Eucalyptus* plantations.

Key words: *Eucalyptus* plantations, forest age, soil organic carbon, soil labile organic carbon pool, carbon pool management index

森林土壤有机碳库是全球土壤碳库的重要组成部分,主要存在于枯枝落叶和土壤表层(Pregitzer & Euskirchen, 2010),其含量的变化对全球碳循环和二氧化碳通量的改变起到关键的作用(张鹏等, 2009)。土壤有机碳作为土壤碳库的重要组成部分,不仅能直接反映土壤的肥力水平,衡量土壤质量(周国模和姜培坤, 2004),还能有效反

映土地经营管理水平,并可以用土壤碳库管理指数(carbon pool management index, CPMI)进行量化(Lefroy et al., 1993)。碳库管理指数是指示土壤经营和管理所采取方法是否科学的指标,既能反映外界管理措施对土壤总有机碳的影响,还能反映土壤有机碳组分的变化情况,CPMI值变大说明土地经营措施可以维持和提高土壤质量,其值变

小则表明土壤肥力在下降,土壤质量在下降(徐明岗等,2006)。近期对碳库管理指数的研究主要集中在不同生态恢复模式(蒲玉琳等,2017)、对模拟酸雨响应(张慧玲等,2018)、不同耕作措施(Schiavo et al., 2011)、不同施肥情况(蔺芳等,2018)、不同土地利用方式(张亚杰等,2016)、不同还田方式(李硕等,2015)等方面,以上多数研究结果反映了长期定位研究下的累积效应。而不同的森林植被类型和林地经营历史,一般会影响到土壤有机碳库的量及土壤剖面的分布规律(冯瑞芳等,2006)。桉树(*Eucalyptus*)因其适应性强、生长快速、轮伐周期短、用途广泛和经济效益高等优点,被世界许多国家引种和大规模推广,已成为当前我国解决林业资源危机的重要途径之一。揭示桉树人工林短期生长期土壤碳库管理指数的变化特征,有利于调整和优化营林措施。

研究表明,人工林能有效固持大气中的碳(Pan et al., 2011),也会导致土壤碳库的巨大变化(史军等,2006)。我国桉树人工林面积已超过 450 万 hm^2 ,广西桉树人工林的面积约占全国桉树种植面积的二分之一(张健军等,2012)。桉树人工林土壤有机碳的变化对全球碳循环有重要影响(张苏峻等,2010),桂北低山丘陵地区桉树人工林多采取的是集体和个人承包,多采用施肥、农药、除草剂等高强度、粗放型经营管理,部分在 3~4 a 即开始采伐,有关不同林龄桉树人工林土壤碳库管理指数的研究尚未见报道,在 1 a 到 8 a 间隔较短但桉树生长变化又快的这一段时间内,不同林龄下土壤碳库管理指数的响应特征是什么。这对于准确评价桉树林地土壤肥力以及制定合理的管理措施有重要意义。因此,通过对广西北部低山丘陵地区不同林龄桉树人工林土壤有机碳和活性有机碳含量及碳库管理指数的研究,探讨林龄对桉树人工林土壤碳库管理指数的影响及其规律,旨在为桉树人工林的可持续利用,提高经营与管理水平,增强桉树人工林生态系统的碳汇功能提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于广西黄冕林场波寨村,地处广西

柳州市鹿寨县与广西桂林永福县交界。地理坐标为 $109^{\circ} 43' 46''$ — $109^{\circ} 58' 18''$ E、 $24^{\circ} 37' 25''$ — $24^{\circ} 52' 11''$ N。黄冕林场地形起伏大,坡面险峻,地貌主要有低山地貌和丘陵地貌,属于中亚热带气候,气候温和,四季分明,无霜期长,雨热同季;年均气温为 19°C ,年平均降雨量为 $1\ 750\sim 2\ 000\ \text{mm}$,降雨量集中在 4—8 月,年均蒸发量为 $1\ 426\sim 1\ 650\ \text{mm}$,热量丰富。黄冕林场林地属地质年代属泥盆系,林地土壤主要以砂岩、砂页岩、夹泥岩发育而成的红壤、山地黄红壤为主。

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集

于 2013 年 4 月中旬,在野外详细调查的基础上,采用时空互代法,选择由本底资料和时间一致的马尾松次生林改种而来的 6 个不同林龄(1、2、3、4、5 和 8 a)桉树(巨尾桉,*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)为研究对象,选择营林、管理方法、海拔、坡向、坡度、土壤母质等条件基本一致或相近的林地,各设置不同林班和间隔 60~100 m 的 3 块面积约 $20\ \text{m} \times 20\ \text{m}$ 的样地作为 3 个重复,共计 18 块。同时,在邻近未被砍伐和未被改种为桉树的马尾松林(*Pinus massoniana*, 10 a),设置 3 块 $20\ \text{m} \times 20\ \text{m}$ 标准样地作为对照。采样前去除地表凋落物,按照 S 型方法在各样地中选取 5 个代表性样点采取土壤样品,按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 4 个层次用土壤取样器(直径 5 cm)分层取土,同层土壤混匀为 1 个土样。将采集的土壤样品,装在无菌自封袋中,带回实验室风干后常规处理,用于土壤理化性质的测定。

2.2 试验方法

土壤容重采用环刀法(鲍士旦,2000)测定;土壤有机碳(SOC)采用总有机碳分析仪(岛津 TOC-5000A,日本)测定;全氮(TN)通过 Vario ELIII 元素分析仪(德国)分析;土壤活性有机碳(LOC)采用 $333\ \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}\ \text{KMnO}_4$ 氧化法测定(Blair et al., 1995)。相关指标的计算(徐明岗等,2006):碳库活度(A)=活性有机碳/非活性有机碳含量;碳库活度指数(AI)=土壤碳库活度/参考土壤碳库活

度;活性碳有效率(AC)=活性有机碳/有机碳;碳库指数(CPI)=土壤有机碳/参考土壤有机碳;碳库管理指数(CPMI)=碳库指数×碳库活度指数×100;土壤非活性有机碳(NLOC)=土壤有机碳-土壤活性有机碳。土壤碳储量(S)= $10C \cdot \rho \cdot h$,式中: $C(g \cdot kg^{-1})$ 为有机碳质量比; $\rho(g \cdot cm^{-3})$ 为土壤容重; $h(cm)$ 为实际土层高度(李艳琼等,2018)。本研究中,参考土壤为未被改种为桉树的10 a 马尾松林地土壤。

2.3 数据分析

利用 Excel 2016 和 SPSS22.0 软件对数据进行统计分析。对不同土层土壤各指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 多重比较($\alpha=0.05$),对土壤碳库指数特征进行 Pearson 相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同林龄 0~40 cm 土层土壤碳组分平均值的变化

从表 1 可以看出,不同林龄桉树人工林 0~40 cm 土层土壤有机碳平均值含量随着林龄的增加呈现先增加后下降再增加的趋势,表现为 8 a>5 a>3 a>4 a>2 a>1 a,平均值范围为 3.59~10.80 g·

kg^{-1} ,8 a 土壤有机碳含量是 1 a 和 2 a 的 2~3 倍,呈显著差异($P<0.05$)。随着林龄的增加,桉树人工林地表枯枝落叶物增多,土壤有机碳含量随着林龄加大,2~3 a 是桉树的生长高峰期,土壤有机碳含量增幅较大,4 a 后,桉树的生长亦趋于平缓,有机碳含量增加相对缓慢,随着林龄的增大枯枝落叶以及细根的积累,有机碳含量在 8 a 达到最大值。0~40 cm 土层不同林龄桉树人工林土壤非活性有机碳含量、碳储量的变化规律与有机碳一致,其平均值范围分别为 2.76~6.73 $g \cdot kg^{-1}$ 、436.10~1602.33 $g \cdot m^{-2}$ 。0~40 cm 土层土壤活性有机碳含量则随着林龄的增加而持续增加,表现为 8 a>5 a>4 a>3 a>2 a>1 a,占土壤有机碳的比例分别为 23.12%、26.05%、24.67%、28.83%、25.70%、37.69%,可见活性有机碳占有机碳比例的变化规律不明显,而不同林龄土壤非活性有机碳是有机碳的主要部分,占有机碳的 62.31%~76.88%。与对照 10 a 马尾松林相比,8 a 桉树人工林土壤有机碳、活性有机碳、非活性有机碳含量以及碳储量均高于马尾松林,而 1~5 a 则相反,均小于马尾松林,说明该地改种桉树 8 a 后,土壤碳组分含量有所提高。

表 1 不同林龄 0~40 cm 土层土壤碳组分的变化规律

Table 1 Variation of soil carbon components in 0~40 cm soil layers at different forest ages

林分类型 Forest types	SOC($g \cdot kg^{-1}$)	LOC ($g \cdot kg^{-1}$)	NLOC ($g \cdot kg^{-1}$)	S($g \cdot m^{-2}$)
1 a	3.59 ±0.52C	0.83 ±0.17D	2.76 ±0.37B	436.10 ±58.24C
2 a	4.30 ±0.49C	1.12 ±0.21CD	3.17 ±0.31B	545.96 ±60.22C
3 a	6.04 ±0.60BC	1.49 ±0.22CD	4.55 ±0.41AB	930.08 ±85.46B
4 a	5.55 ±0.52BC	1.60 ±0.23CD	3.95 ±0.32B	902.21 ±105.44B
5 a	7.16± 0.69B	1.84 ±0.58C	5.33 ±0.48AB	1 155.90± 132.96B
8 a	10.80±1.20A	4.07 ±0.47A	6.73 ±0.67A	1 602.33±227.71 A
马尾松林 Pine massoniana forest (10 a)	9.00±1.03A	2.955 ±0.17B	6.044±0.64A	1 429.173±195.19A

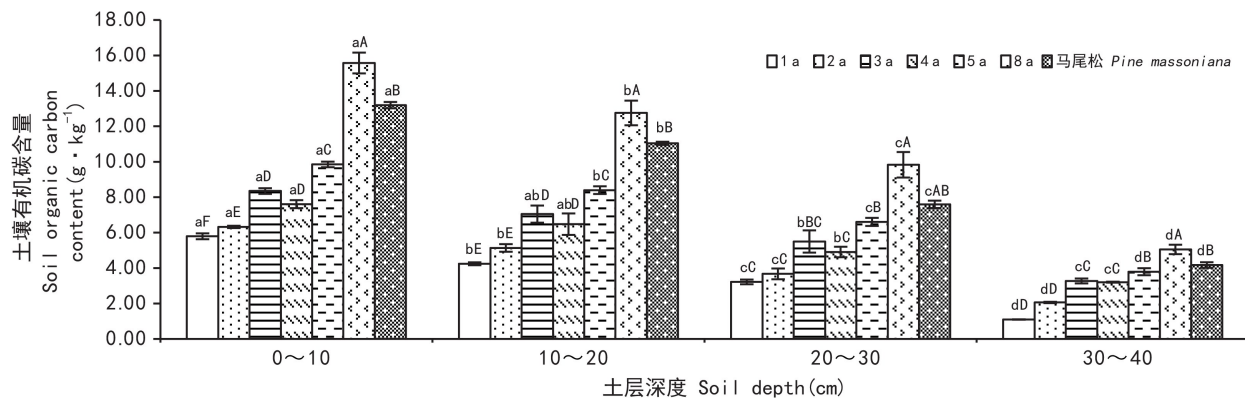
注:数据为 0~40 cm 土层平均值±标准误差,同一列的不同大写字母表示差异显著($P<0.05$)。SOC. 土壤有机碳; LOC. 土壤活性有机碳; NLOC. 土壤非活性有机碳; S. 碳储量。下同。

Note: The values in the table are $\bar{x} \pm s_x$ of 0~40 cm soil layers, and the different capital letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). SOC. Soil organic carbon; LOC. Soil labile organic carbon; NLOC. Soil not labile organic carbon; S. Carbon storage. The same below.

3.2 不同林龄对不同土层土壤碳组分含量的影响

3.2.1 土壤有机碳的变化 不同林龄桉树人工林

各土层土壤有机碳的变化情况见图 1。从图 1 可以看出,1~8 a 土壤有机碳含量的范围在 5.79~



不同小写字母表示同一林龄不同土层间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一土层不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences in different soil layers of the same forest age ($P < 0.05$), different capital letters indicate significant differences in different forest ages of the same soil layer ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同林龄土壤有机碳的变化

Fig. 1 Changes of soil organic carbon at different forest ages

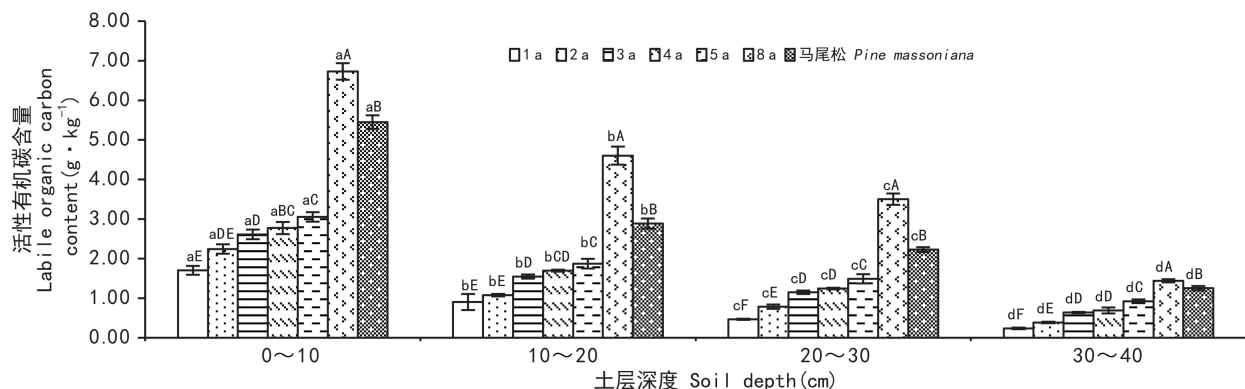


图 2 不同林龄土壤活性有机碳的变化

Fig. 2 Variation of soil labile organic carbon at different forest ages

15.57 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。各林龄 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 土层土壤有机碳含量的变化与 0~40 cm 土层土壤有机碳平均含量变化一致, 其大小顺序表现为 8 a > 5 a > 3 a > 4 a > 2 a > 1 a, 随着土层加深, 各林龄土壤有机碳含量均逐渐降低, 1 a 桉树人工林土壤 0~10 cm 土层有机碳含量是 30~40 cm 土层的 5.30 倍, 差异显著 ($P < 0.05$), 而其他林龄 0~10 cm 土层有机碳含量是 30~40 cm 土层的 2~3 倍, 反映出土壤有机碳的分布具有一定的表聚性。与 10 a 马尾松林相比, 8 a 桉树人工林各土层土壤有机碳含量均显著大于马尾松林, 20~30

cm 和 30~40 cm 土层 5 a 桉树人工林土壤有机碳含量和 10 a 马尾松林无显著差异, 而其他 1~5 a, 则均小于马尾松林。

3.2.2 活性有机碳的变化 由图 2 可知, 各土层土壤活性有机碳含量具有相同的分布规律, 均随着林龄的增加而增加。0~10 cm 土层在 1~5 a 中: 1~2 a 土壤活性有机碳含量的增量最大, 为 $0.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2~5 a 的增量范围在 $0.16 \sim 0.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。1~8 a 桉树人工林 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 土层土壤活性有机碳含量占土壤有机碳的比例分别为 29.45% ~ 43.38%、21.09% ~ 36.28%、

14.57%~36.03%、18.81%~28.62%，占比随着林龄的增加无明显规律。1 a 各土层土壤活性有机碳含量均小于其他林龄的相应土层，8 a 各土层土壤活性有机碳含量均大于其他林龄的相应土层。随着土层的加深，各林龄土壤活性有机碳含量的变化规律与土壤有机碳一致，林龄不同，下降的幅度有所差异，如 1 a 各土层下降的范围为 26.93%~52.00%，3 a 的为 26.72%~44.50%。与 10 a 马尾松林相比，8 a 桉树人工林在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层土壤活性有机碳含量均显著大于对照马尾松林。

3.2.3 非活性有机碳的变化 同一土层不同林龄桉树人工林土壤非活性有机碳的变化规律不一致(图 3)，0~10 cm 土层各林龄土壤非活性有机碳的大小顺序为 8 a>5 a>3 a>4 a>1 a>2 a，其他土层均为 8 a>5 a>3 a>4 a>2 a>1 a。虽然土壤非活性有机碳 3 a 大于 4 a，但彼此间的差异不显著($P>0.05$)，5 a 和 8 a 均显著大于 1~4 a，土壤非活性有机碳随着林龄的增加整体均有增加的趋势。0~10 cm、10~20 cm 土层随林龄增加的幅度大于 20~30 cm、30~40 cm 土层。除 30~40 cm 土层外，其他土层 2 a 和 1 a 之间土壤非活性有机碳的差异均不显著($P>0.05$)。土壤非活性有机碳的变化规律与土壤有机碳一致，均随着土层的加深而减少，减少量最大的是 8 a。同一林龄不同土层间土壤非活性有机碳均表现出一定的差异($P<0.05$)。

3.3 不同林龄对土壤有机碳储量的影响

不同林龄桉树人工林土壤有机碳储量的变化特征见图 4。从图 4 可以看出，1~8 a 土壤碳储量的范围为 140.34~264 9.42 g·m⁻²。不同林龄土壤碳储量在 0~10 cm、10~20 cm 均随林龄的增加而增加；在 20~30 cm、30~40 cm 土层的变化趋势与土壤有机碳一致，先增加至 3 a，3~4 a 略减少，4~8 a 再增加，但总体呈现增加的趋势。各土层 8 a 的碳储量最大，说明在林分经营过程中，适当延长林木的生长期会有利于土壤有机碳储量的提高，轮伐周期较长能减缓土壤有机碳库的消耗。各林龄随着土层的加深土壤碳储量的变化与有机碳一致，均随着土层的加深而减少，不同林龄各土层间碳储量均具有显著差异($P<0.05$)。与 10 a 马尾松林相比，8 a 桉树人工林土壤碳储量高于马

尾松林，说明该地改种桉树 8 a 后，土壤碳储量有所增加。

3.4 不同林龄对土壤碳库管理指数的影响

不同林龄桉树人工林碳库管理指数的变化如表 2 所示。随着林龄的增加，同一土层土壤碳库活度和碳库活度指数的变化规律不明显，但 8 a 的碳库活度和碳库活度指数均大于其他林龄。总体而言，桉树人工林林地 0~40 cm 土层碳库活度及碳库活度指数随林龄的增加整体呈增加的趋势，说明桉树人工林的土壤碳库活性增大，土壤中的活性有机碳与非活性有机碳处于一种良性周转的动态平衡之中，反映了土壤中碳素质量得到改善。随着土层的加深，各林龄桉树人工林地土壤碳库活度整体呈减小的趋势，碳库活度指数随土层的变化规律不明显，如 1 a 为 10~20 cm(0.79)>30~40 cm(0.65)>0~10 cm(0.60)>20~30 cm(0.41)，8 a 则是随着土层的加深而降低。

不同土层土壤碳库指数的变化与土壤有机碳相似，表现为 8 a>5 a>3 a>4 a>2 a>1 a，随着林龄的增加和土层的加深，整体表现为增加的趋势。各林龄同一土层碳库管理指数表现为随着林龄的增加而增加。同一林龄不同土层土壤碳库管理指数的分布趋势不一致。除 5 a 外，其他林龄 10~20 cm 土层碳库管理指数均大于 20~30 cm 和 30~40 cm 土层。这可能与土壤表层有机碳的来源和深层根系对矿质营养的吸收以及土壤微生物活性有关，表层有机碳主要来源于植物凋落物和分布在表层根系的凋亡，同时表层适宜的温度和水分有利于凋落物分解转化，同时促进了土壤微生物活动，使土壤的碳素循环加快，从而增加土壤碳库，碳库管理指数较高，底层因土壤根系对矿质营养的强烈吸收，促进了土壤有机碳的分解，碳库管理指数较低。

3.5 土壤碳库管理指数与土壤碳组分、全氮及容重之间的相关性

通过分析土壤碳库管理指数与土壤碳组分及土壤全氮、容重之间的相关性(表 3)，土壤活性有机碳与土壤有机碳、碳储量、碳库活度、碳库管理指数均呈极显著的正相关关系($P<0.01$)；与土壤全氮、容重呈显著相关($P<0.05$)；非活性有机碳与

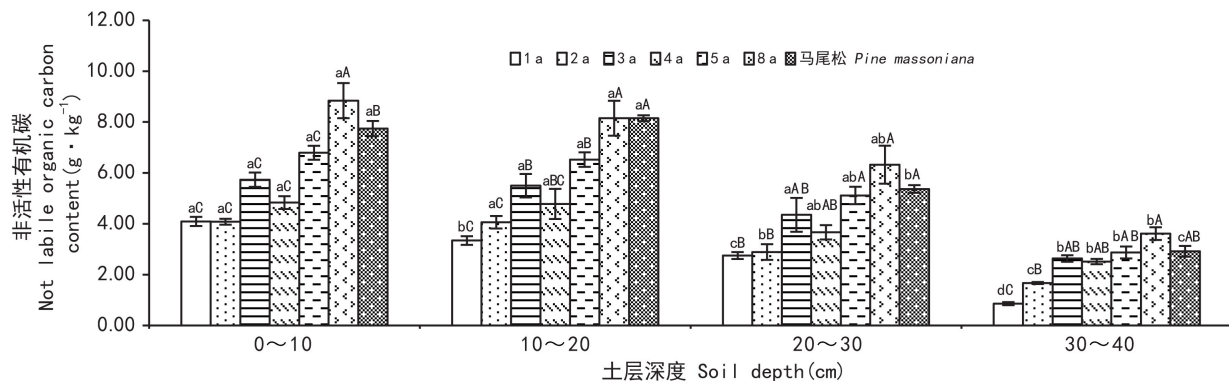


图 3 不同林龄土壤非活性有机碳的变化

Fig. 3 Variation of soil not labile organic carbon at different forest ages

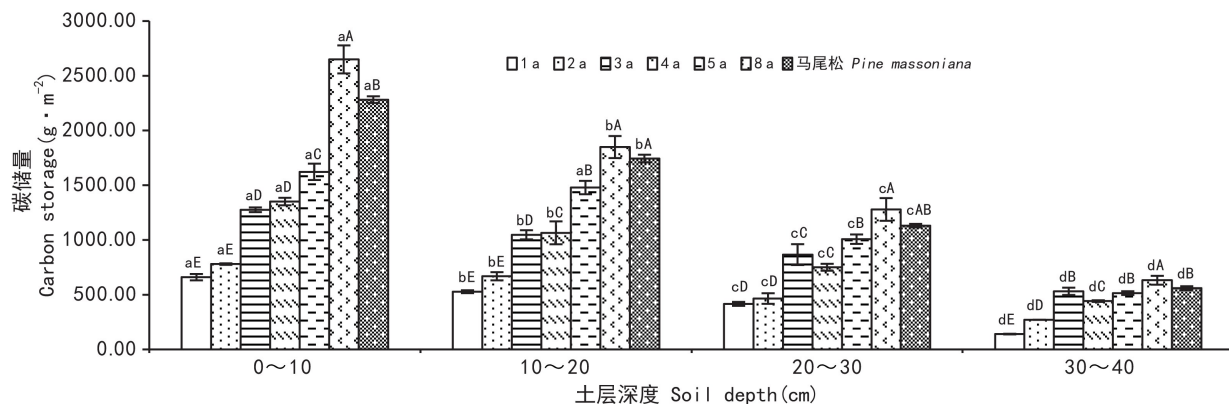


图 4 不同林龄土壤碳储量的变化特征

Fig. 4 Change characteristics of soil carbon storage at different forest ages

土壤有机碳、活性有机碳、全氮、容重等均呈极显著负相关或显著负相关。碳库活性与碳库活度指数间存在极显著的正相关关系,并与活性有机碳、有机碳、碳储量、碳库指数、碳库管理指数及全氮、容重达极显著相关或显著相关。碳库管理指数与土壤活性有机碳、全氮、容重之间都表现为显著相关或极显著相关,表明碳库管理指数能够指示桉树人工林土壤肥力水平的变化。

3.6 土壤活性有机碳、碳库管理指数与林龄的耦合分析

如表 4 所示,土壤有机碳、活性有机碳、非活性有机碳和碳库管理指数随着林龄增长呈线性增长,相关系数均在 0.90 以上,具有很好的统计学意义。随着林龄的增加,土壤有机碳、活性有机碳、

非活性有机碳和碳库管理指数的年增长率分别为 1.012、0.445、0.567 和 17.685 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明随着林分年龄的延长,桉树人工林的凋落物较丰富,土壤有机碳库得以增加,有利于土壤碳储量的提高和土壤碳汇功能的增强,土壤质量得到改善。

4 讨论与结论

土壤有机碳是衡量土壤质量和土地可持续利用管理中一个考虑的重要指标(张金波和宋长春, 2003),一般会受自然因素(气候、地形、降水、植被、土壤质地等)和人为因素(放牧、土地利用、种植制度等)的影响(常小峰等, 2013)。唐国勇等(2011)的研究表明,种植人工林有利于增加森林

表 2 不同林龄土壤碳库管理指数的变化特征
Table 2 Variation of soil carbon pool management index at different forest ages

	林龄 Forest age (a)	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm
A	1	0.42	0.27	0.17	0.28
	2	0.55	0.27	0.28	0.23
	3	0.46	0.28	0.28	0.24
	4	0.58	0.36	0.34	0.28
	5	0.45	0.29	0.30	0.33
AI	8	0.77	0.57	0.57	0.40
	1	0.60	0.79	0.41	0.65
	2	0.78	0.76	0.67	0.54
	3	0.65	0.81	0.68	0.57
	4	0.82	1.02	0.83	0.64
CPI	5	0.64	0.82	0.71	0.76
	8	1.09	1.65	1.37	0.93
	1	0.44	0.38	0.42	0.26
	2	0.48	0.47	0.48	0.49
	3	0.63	0.64	0.72	0.79
CPMI	4	0.58	0.59	0.65	0.77
	5	0.75	0.76	0.87	0.91
	8	1.18	1.15	1.29	1.21
	1	26.12	30.33	17.36	16.96
	2	37.40	35.16	32.19	26.63
	3	40.96	51.07	47.11	44.75
	4	46.97	59.34	52.94	49.28
	5	47.64	61.77	61.73	68.16
	8	128.46	187.68	175.67	112.65

注: A. 碳库活度; AI. 碳库活度指数; CPI. 碳库指数; CPMI. 碳库管理指数。下同。

Note: A. Carbon pool activity; AI. Carbon pool activity index; CPI. Carbon pool index; CPMI. Carbon pool management index. The same below.

土壤碳库,表明人工林具有较强的养分富集和培肥能力。本研究结果得出,不同林龄桉树人工林土壤有机碳、非活性有机碳、碳储量均随着林龄的增加而增加,这与薛蕙等(2009)、张慧玲等(2018)的结论相似,说明林龄的增加,桉树林地土壤碳库趋于增加。随着土层的加深,不同林龄桉

树人工林的土壤有机碳、非活性有机碳、碳储量均逐渐减少。土壤活性有机碳是土壤碳循环的关键及动力,对土壤碳收支及全球变化具有重要意义。不同林分类型以及土层深度会影响到其含量。薛蕙等(2011)研究表明,土壤碳库的变化主要发生在活性碳库部分,而苏静等(2005)研究碳库的变化主要是由于非活性有机碳含量的变化。本研究表明,不同林龄土壤非活性有机碳是有机碳的主要部分,占有有机碳的比例为 62.31%~76.88%,土壤碳库的变化主要是由于非活性有机碳库的变化,这和苏静等(2005)的研究结果相似。该研究得出,1~8 a 桉树人工林土壤活性有机碳随着林龄的增加而增加,且 5 a 和 8 a 土壤活性有机碳的含量显著大于前 5 年或前 8 年,这与薛蕙等(2009)、崔静等(2013)、王纪杰等(2015)研究结论相似。说明土壤活性有机碳的含量受林龄的影响:一方面随着桉树的生长,林木的枯枝落叶以及林下植被的生物量较多,从而影响到了土壤有机碳的含量,而有机碳的含量在很大程度上决定了活性有机碳的含量(杜满义等,2010);另一方面,林龄的延长,林地土壤养分状况会发生变化,这对活性有机碳同样产生较大影响。随着土层的加深,土壤活性有机碳呈现减少的现象,活性有机碳主要富集在 0~10 cm 以及 10~20 cm 土层,此结果与崔东等(2017)、蔺芳等(2018)的研究结果类似。研究表明,土壤活性有机碳占有有机碳的比例越高,说明有机碳活性越强,被分解矿化的潜力越大,养分循环速率越快,不利于土壤有机碳的积累(Xiao et al., 2015)。此外,已有研究表明,土壤活性有机碳与土壤理化性质有密切的相关关系(徐明岗等,2006;祝滔等,2013)。该研究中,0~40 cm 土壤活性有机碳平均值占有有机碳的比例随林龄的变化规律不明显,活性有机碳与土壤有机碳、碳储量、碳库活度、碳库管理指数均呈极显著的正相关关系,相关系数均在 0.9 以上,与土壤全氮、容重呈显著相关关系,这进一步说明土壤有机碳不仅是评价土壤质量的指标,土壤活性有机碳同样可以作为检验土壤质量的关键指标,反映了土壤的肥力状况和林龄对土壤质量的影响效果。

土壤碳库管理指数指示了土地管理措施变化

表 3 土壤碳组分、碳库管理指数与土壤全氮及容重之间的相关性

Table 3 Correlation among soil carbon components, carbon pool management index, soil total nitrogen and bulk density of soils

土壤属性 Soil properties	S	LOC	A	AI	CPI	CPMI	TN	NLOC	容重 Bulk density
SOC	0.975 **	0.984 **	0.985 **	0.902 *	0.907 *	0.998 **	0.969 **	-0.905 *	0.905 *
S	1	0.920 **	0.932 **	0.969 **	0.973 **	0.966 **	1.000 **	-0.966 **	0.966 **
LOC		1	0.992 **	0.817 *	0.821 *	0.988 **	0.910 *	-0.824 *	0.824 *
A			1	0.853 **	0.856 *	0.992 **	0.923 **	-0.864 *	0.864 *
AI				1	0.999 **	0.896 *	0.972 **	-0.999 **	0.999 **
CPI					1	0.898 *	0.977 **	-0.997 **	0.997 **
CPMI						1	0.960 **	-0.901 *	0.901 *
TN							1	-0.969 **	0.969 **
NLOC								1	-1.00 **

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性达显著水平。TN. 全氮。

Note: * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively. TN. Total nitrogen.

表 4 土壤活性有机碳、碳库管理指数与
生长年限的耦合分析Table 4 Coupling analysis of soil labile organic carbon,
carbon pool management index and growth year

土壤属性 Soil properties	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient (R^2)
SOC	$y = 1.012 1x + 2.359 6$	0.957 7
LOC	$y = 0.444 9x + 0.118 3$	0.912 7
NLOC	$y = 0.567 1x + 2.241 3$	0.925 7
CPMI	$y = 17.68 5x - 7.029 6$	0.902 5

引起的土壤有机碳库的变化, 不仅能对土壤质量状况(上升或下降)或者更新程度作出反映, 较全面和动态地反映外界活动对土壤碳库中各组分质量的影响(沈宏等, 1999; 徐明岗, 2006), 还能够反映不同林分类型对土壤质量的影响(崔静等, 2013)。碳库管理指数越高, 土壤活性有机碳的更新就越快、流通量越大, 土壤腐殖质和土壤的空隙、孔隙数量以及土壤的通气性也明显增加和提高, 说明采取的管理措施利于提高土壤质量和林木的生长发育, 反之, 则不利于土壤肥力(袁喆等, 2010)。薛蕙等(2009)研究表明, 封育 13 a 和封

育 18 a 的碳库管理指数均高于封育 3 a。佟小刚等(2013)研究得出, 退耕 40 a 后土壤碳库管理指数为刺槐林>沙棘林>柠条林。郭宝华等(2014)研究表明, 不同林分下碳库管理指数表现为木荷次生林>毛竹人工林>杉木人工林>撂荒地。本研究中, 不同林龄桉树人工林土壤碳库指数和碳库管理指数均表现为 8 a>5 a>3 a>4 a>2 a>1 a, 即随着林龄的增加而增加; 相关性分析表明, 桉树人工林林下土壤碳库管理指数与土壤有机碳、活性有机碳、全氮、容重之间都表现为极显著相关, 且相关系数均在 0.9 以上, 这与崔静等(2013)对黄土丘陵区柠条林的研究结果相似。这表明, 随着桉树人工林林龄的延长, 如 8 a 的桉树林, 能提高土壤有机碳含量和土壤碳库管理指数, 有利于改善土壤质量, 提高土壤肥力, 桉树林地土壤有机碳库处于良性管理状态。同时也说明, 在人工林经营中被采取的 4~5 a 作为短期轮伐期, 从长远来说, 不利于土壤碳库功能的稳定。

有研究表明, 桉树造林会显著降低土壤有机碳等养分含量, 从而引起土地贫瘠以及退化, 造成土地肥力下降乃至枯竭, 不利于土壤水土功能的维持和可持续利用(吕小燕等, 2017)。不同的是: 邓荫伟等(2010)的研究发现, 10 a 桉树人工林土壤有机碳、全氮等养分含量均接近或超过马尾松

林;何斌等(2016)认为,2~6 a 尾巨桉人工林铁、锰、铜等微量元素的贮存量随着林分年龄的增加而增加;王纪杰等(2015)研究表明,桉树人工林的轮伐周期较长有利于维持土壤有机碳库的稳定。潘嘉雯等(2018)研究得出,林分年龄能显著影响广西、广东、云南的桉树生长。本研究结果表明,1~8 a 桉树人工林土壤有机碳等含量随着林龄的增加呈线性增加的趋势,且 8 a 桉树人工林显著大于对照 10 a 马尾松林,适当延长桉树人工林的轮伐周期,会有利于维持土壤有机碳库的稳定,这与王纪杰等(2015)的研究结果相似。而与吕小燕等(2017)有所不同。这可能与桉树轮伐周期(一般是 4~5 a)有关,研究表明,轮伐期过短不仅会影响桉树林下物种多样性,对养分含量和养分循环也有很大的影响(平亮和谢宗强,2009),桉树会从土壤中吸收一部分养分用于干物质生产并储存在树干中,桉树养分利用率越高,树干单位体积营养元素含量越低,砍伐后这部分养分流失得越少,桉树一般在生长 7 a 后养分利用率达到最大,从而使单位体积树干中营养元素含量下降。如果轮伐期过短,就会导致桉树在养分利用率较低的情况下被砍伐,树干中的养分较高,砍伐后树干或者剩余枝条被带离土壤,从土壤中吸收的那部分养分没有及时归还,导致土壤养分减少,不利于土地资源的可持续利用,特别是退化土地上的植被恢复(Davidson et al., 1993)。此外,如果砍伐后,将主干以外的枝条和凋落物带走,也会影响到桉树人工林地养分的循环,因为桉树可以通过大枝等木质残体和凋落物归还一定量的养分(Bargali et al., 1992)。在本研究中的 8 a 桉树,林下的凋落物和腐烂根系相对有一定累积,土壤结构得到了一定的改善。首先,这与研究区域土壤的属性有关,Schmidt et al.(2011)的研究表明,土壤环境因子(土壤微生物、湿度、养分情况等)对土壤有机碳起作用,有机碳作用于土壤的同时其自身性质也依赖于土壤环境。其次,还可能与桉树的经营管理措施有关,该研究区桉树的生长前期虽然均采用了除草剂,包括人为砍断等对林下植被进行清除,但随着林龄的增加,8 a 桉树林地地表土壤还是保留有一定量的凋落物或者植被覆盖,林地土壤微

环境较好,有利于微生物生存和活动,对于主要来源是凋落物和腐烂根系的土壤碳组分,具有良好的促进效应。

综上所述,广西北部低山丘陵地区不同林龄(1 a、2 a、3 a、4 a、5 a 和 8 a)的桉树人工林,相对于对照马尾松林,桉树人工林的土壤有机碳、活性有机碳、非活性有机碳、碳储量以及碳库管理指数均随林龄的延长而增加,尤其在 8 a 差异更显著,表明林龄的延长会有利于林地土壤碳含量的积累,土壤碳库显著增加。因此,从提高土壤碳库方面考虑,在满足木材供应的情况下可以适当延长林木的轮伐周期,同时减少人为对凋落物和林下植被的干扰,适当保留地面枯落物和凋落物,并采用较为合理的管理和抚育措施以及采伐行为,将有助于减缓桉树林地土壤碳库的消耗,以防止林地土壤碳库的衰退,提高桉树林土壤碳库储量,以实现桉树人工林的可持续经营和发展。

致谢 对程桂霞,蒋玉龙,李翠玲在样品分析方面给予的大力协助,谨此致谢!

参考文献:

- BAO SD, 2000. Soil agricultural chemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press:14-112. [鲍士旦, 2000. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社: 14-112.]
- BARGALI SS, SINGH SP, SINGH RP, 1992. Structure and function of anageseries of eucalypt plantations in central Himalaya. 1. dry-matter dynamics [J]. Annal Bot, 69: 405-411.
- CHANG XF, WANG SP, XU GP, et al., 2013. Key factors affecting soil organic carbon pool and its uncertainty [J]. Guihaia, 33(5): 710-716. [常小峰, 汪诗平, 徐广平等, 2013. 土壤有机碳库的关键影响因素及其不确定性 [J]. 广西植物, 33(5): 710-716.]
- CUI D, XIAO ZG, ZHAO Y, et al., 2017. Effects of different land use types on soil active organic carbon pool and carbon pool management index in Yili area [J]. J Soil Water Conserv, 1:61-67. [崔东, 肖治国, 赵玉, 等, 2017. 不同土地利用类型对伊犁地区土壤活性有机碳库和碳库管理指数的影响 [J]. 水土保持研究, 1:61-67.]
- CUI J, CHEN YM, CAO Y, et al., 2013. Evolution of soil organic carbon components and carbon pool management index of artificial *Caragana korshinskii* forest in loess hilly region [J]. J Soil Water Conserv, 20(1): 52-56. [崔静, 陈云明, 曹杨, 等, 2013. 黄土丘陵区人工柠条林土壤有机碳组分和

- 碳库管理指数演变 [J]. 水土保持研究, 20(1): 52-56.]
- DAVIDSON J, 1993. Ecological aspects of *Eucalyptus plantations* [M]//WHITE K, BALL J, KASHIO M, eds. Proceedings of the Regional Expert Consultation on *Eucalyptus*, 4-8, October, 1993, Vol. 1. Bangkok: FAO Regional Office for Asia and the Pacific; 35-60.
- DENG YW, LI F, WEI J, et al., 2010. Investigation on vegetation and soil factors of *Eucalyptus*, *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* in Guilin City [J]. J Guangxi For Sci, 39(3): 140-143. [邓荫伟, 李凤, 韦杰, 等, 2010. 桂林市桉树、马尾松、杉木林下植被与土壤因子调查 [J]. 广西林业科学, 39(3): 140-143.]
- DU MY, FAN SH, QI LH, et al., 2010. Soil carbon and nitrogen characteristics and their coupling relationships in different types of bamboo forests [J]. J Soil Water Conserv, 24(4): 198-202. [杜满义, 范少辉, 漆良华, 等, 2010. 不同类型毛竹林土壤碳、氮特征及其耦合关系 [J]. 水土保持学报, 24(4): 198-202.]
- FENG RF, YANG WQ, ZHANG J, 2006. Plantation management and global change mitigation [J]. Acta Ecol Sin, 26(11): 3870-3877. [冯瑞芳, 杨万勤, 张健, 2006. 人工林经营与全球变化减缓 [J]. 生态学报, 26(11): 3870-3877.]
- GUO BH, FAN SH, DU MY, et al., 2014. Effects of land use patterns on soil activated carbon pool and carbon pool management index [J]. Chin J Ecol, 33(3): 723-728. [郭宝华, 范少辉, 杜满义, 等, 2014. 土地利用方式对土壤活性碳库和碳库管理指数的影响 [J]. 生态学杂志, 33(3): 723-728.]
- HE B, LIAO QY, YANG WX, et al., 2016. Characteristics of accumulation and biological cycling of microelements in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations in continuous age sequences [J]. J Soil Water Conserv, 30(2): 200-207. [何斌, 廖倩苑, 杨卫星, 等, 2016. 连续年龄序列尾巨桉人工林微量元素积累及其生物循环特征 [J]. 水土保持学报, 30(2): 200-207.]
- LEFROY RDB, BLAIR GJ, STRONG WM, 1993. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance [J]. Plant Soil, 155-156(1): 399-402.
- LI F, XING JX, REN SM, et al., 2018. Effects of chicken manure and chemical fertilizer application on fractal characteristics of soil aggregates and carbon pool management index of forage rye/maize rotation [J]. J Soil Water Conserv, 32(5): 183-189. [蔺芳, 邢晶鑫, 任思敏, 等, 2018. 鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤团聚体分形特征与碳库管理指数的影响 [J]. 水土保持学报, 32(5): 183-189.]
- LI S, LI YB, WANG SJ, et al., 2015. Effect of different cropping methods on soil organic carbon and carbon pool management index in Guanzhong Plain [J]. Chin J Appl Ecol, 26(4): 1215-1222. [李硕, 李有兵, 王淑娟, 等, 2015. 关
- 中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响 [J]. 应用生态学报, 26(4): 1215-1222.]
- LI YQ, HUANG YQ, XU GP, et al., 2018. Characteristics of soil nutrients and microbial activities of reed vegetation in the Huixiankarst wetland, Guilin, China [J]. Chin J Ecol, 37(1): 64-74. [李艳琼, 黄玉清, 徐广平, 等, 2018. 桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤养分及微生物活性特征 [J]. 生态学杂志, 37(1): 64-74.]
- LÜ XY, HE B, WU YF, et al., 2017. The soil organic carbon and nitrogen storage and the evolution characteristics of *Eucalyptus* plantations under successive rotation [J]. J Trop Crop, 38(10): 1874-1880. [吕小燕, 何斌, 吴永富, 等, 2017. 连栽桉树人工林土壤有机碳氮储量及其分布特征 [J]. 热带作物学报, 38(10): 1874-1880.]
- PAN JW, LIN N, HE Q, et al., 2018. Factors influencing the productivity of three *Eucalyptus* plantation areas in China [J]. Acta Ecol Sin, 38(19): 6932-6940. [潘嘉雯, 林娜, 何茜, 等, 2018. 我国3个桉树人工林种植区生产力影响因素 [J]. 生态学报, 38(19): 6932-6940.]
- PAN YD, BIRDSEY RA, FANG JY, et al., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. Science, 333(6045): 988-993.
- PING L, XIE ZQ, 2009. Effects of introducing *Eucalyptus* on indigenous biodiversity in China [J]. Chin J Appl Ecol, 20(7): 1765-1774. [平亮, 谢宗强, 2009. 引种桉树对本地生物多样性的影响 [J]. 应用生态学报, 20(7): 1765-1774.]
- PREGITZER KS, EUSKIRCHEN ES, 2010. Carbon cycling and storage in world forests; biome patterns related to forest age [J]. Global Change Biol, 10(12): 2052-2077.
- PU YL, YE C, ZHANG SR, et al., 2017. Changes of soil active organic carbon and carbon pool management index in different ecological restoration models of Zoige sandy grassland [J]. Acta Ecol Sin, 37(2): 367-377. [蒲玉琳, 叶春, 张世榕, 等, 2017. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化 [J]. 生态学报, 37(2): 367-377.]
- SCHIAVO JA, ROSSET JS, PEREIRA MG, 2011. Carbon management index and chemical attributes of an Oxisol under different management systems [J]. Pesqui Agropec Bras, 46(10): 1332-1338.
- SCHMIDT MWI, TORN M, ABOVEN S, et al., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. Nature, 478(7367): 49-56.
- SHEN H, CAO ZH, WANG ZM, 1999. Study of carbon pool management index in soil under different agroecosystems [J]. J Nat Res, 14(3): 206-211. [沈宏, 曹志洪, 王志明, 1999. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究 [J]. 自然资源学报, 14(3): 206-211.]
- SHI J, LIU JY, GAO ZQ, et al., 2005. Study on the effect of afforestation on soil carbon storage [J]. Chin J Ecol, 24(4): 410-416. [史军, 刘纪远, 高志强, 等, 2005. 造林对土壤碳

- 储量影响的研究 [J]. 生态学杂志, 24(4): 410-416.]
- SU J, ZHAO SW, MA JD, et al., 2005. Influence of man-made vegetation on carbon pool in southern Ningxia region in loess plateau [J]. J Soil Water Conserv, (3): 50-52. [苏静, 赵世伟, 马继东, 等, 2005. 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响 [J]. 水土保持研究, (3): 50-52.]
- TANG GY, LI K, SUN YY, et al., 2011. Impacts of land use on soil organic carbon and carbon pool management index [J]. For Res, 24(6): 754-759. [唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等, 2011. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响 [J]. 林业科学研究, 24(6): 754-759.]
- TONG XG, HAN XH, YANG GH, et al., 2013. Indicative role of carbon pool management index on soil organic carbon pool change in returning farmland to forest [J]. Chin Environ Sci, 33(3): 466-473. [佟小刚, 韩新辉, 杨改河, 等, 2013. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用 [J]. 中国环境科学, 33(3): 466-473.]
- WANG JJ, BAO S, LIANG GF, et al., 2015. Change of soil organic carbon content of *Eucalyptus* plantation in different age [J]. J Sichuan For Sci Technol, 36(4): 19-21. [王纪杰, 鲍爽, 梁关峰, 等, 2015. 不同林龄桉树人工林土壤有机碳的变化 [J]. 四川林业科技, 36(4): 92-95.]
- XIAO Y, HUANG Z, LU XG, 2015. Characteristics of soil labile organic carbon fractions and their relation to soil microbial characteristics in four typical wetlands of Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Ecol Engin, 82: 381-389.
- XU MG, YU R, SUN XF, et al., 2006. Effects of long-term fertilization on typical soil active organic matter and carbon pool management index in China [J]. J Plant Nutr Fert, 12(4): 459-465. [徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等, 2006. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 12(4): 459-465.]
- XUE Y, LIU GB, PAN YP, et al., 2009. Evolution of soil active organic carbon and carbon pool management index of artificial *Robinia pseudoacacia* forest in loess hilly region [J]. Chin Agric Sci, 42(4): 1458-1464. [薛蕙, 刘国彬, 潘彦平, 等, 2009. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变 [J]. 中国农业科学, 42(4): 1458-1464.]
- XUE Y, LIU GB, BU SH, et al., 2011. Characteristics of soil carbon management index of different farmland types in hilly loess plateau [J]. Acta Agric Boreal-Occident Sin, 20(10): 192-195. [薛蕙, 刘国彬, 卜书海, 等, 2011. 黄土丘陵区不同农田类型土壤碳库管理指数分异研究 [J]. 西北农业学报, 20(10): 192-195.]
- YUAN Z, LUO CD, LI XW, et al., 2010. Effects of thinning intensity on soil oxidizable carbon and carbon pool management index of artificial alpine spruce forest in western Sichuan [J]. J Soil Water Conserv, 24(6): 127-131. [袁喆, 罗承德, 李贤伟, 等, 2010. 间伐强度对川西亚高山人工云杉林土壤易氧化碳及碳库管理指数的影响 [J]. 水土保持学报, 24(6): 127-131.]
- ZHANG HL, WU JP, XIONG X, et al., 2018. Effects of simulated acid rain on soil labile organic carbon and carbon management index in subtropical forests of China [J]. Acta Ecol Sin, 38(2): 657-667. [张慧玲, 吴建平, 熊鑫, 等, 2018. 南亚热带森林土壤碳库稳定性与碳库管理指数对模拟酸雨的响应 [J]. 生态学报, 38(2): 657-667.]
- ZHANG JB, SONG CC, 2003. Sensitivity evaluation index of land use mode on soil carbon pool [J]. Ecol Environ, 12(4): 500-504. [张金波, 宋长春, 2003. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标 [J]. 生态环境, 12(4): 500-504.]
- ZHANG JJ, WEI XJ, FU F, et al., 2012. Investigation and economic benefit evaluation of fast-growing and high-yield forest of *Eucalyptus* in Guangxi [J]. Green Chin, 9: 34-37. [张健军, 韦晓娟, 傅锋, 等, 2012. 广西桉树速生丰产林调查与经济效益评价 [J]. 绿色中国, 9: 34-37.]
- ZHANG P, ZHANG T, CHEN NL, 2009. Distribution characteristics and influencing factors of soil carbon and nitrogen in vertical belt of Beijiao Mountain, Qilian Mountains [J]. Chin J Appl Ecol, 20(3): 518-524. [张鹏, 张涛, 陈年来, 2009. 祁连山北麓山体垂直带壤碳氮分布特征及影响因素 [J]. 应用生态报, 20(3): 518-524.]
- ZHANG SJ, LI YM, ZHOU Y, et al., 2010. Soil total organic carbon density and its influencing factors in *Eucalyptus* plantations in western Guangdong [J]. J Central S For Technol, 30(5): 22-28. [张苏峻, 黎艳明, 周毅, 等, 2010. 粤西桉树人工林土壤总有机碳密度及其影响因素 [J]. 中南林业科技大学学报, 30(5): 22-28.]
- ZHANG YJ, QIAN HH, LI FS, et al., 2016. Differences in nutrient and carbon pool management indices between karst slopes in different land management and utilization methods [J]. Carsol Sin, 35(1): 27-35. [张亚杰, 钱慧慧, 李伏生, 等, 2016. 不同土地管理和利用方式喀斯特坡地养分和碳库管理指数的差异 [J]. 中国岩溶, 35(1): 27-35.]
- ZHOU GM, JIANG PK, 2004. Effects of different vegetation restorations on the active carbon pool of invasive red soils [J]. J Soil Water Conserv, 18(6): 68-70. [周国模, 姜培坤, 2004. 不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响 [J]. 水土保持学报, 18(6): 68-70.]
- ZHU T, HAO QJ, XU P, et al., 2013. Effects of land use patterns on soil active organic matter and its carbon pool management index in Jinyun Mountain [J]. Environ Sci, 34(10): 4009-4016. [祝滔, 郝庆菊, 徐鹏, 等, 2013. 缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 [J]. 环境科学, 34(10): 4009-4016.]