

广东省阳江市国有花滩林场四种典型人工林土壤碳储量特征

黎燕莲¹, 莫其锋^{2*}, 刘悦², 陈远富¹, 吴妙兰², 顾晓娟², 梁顿¹

¹广东省阳江市国有花滩林场, 广东 阳春

²华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州

收稿日期: 2023年7月14日; 录用日期: 2023年9月20日; 发布日期: 2023年10月8日

摘要

人工林在森林碳汇中发挥着巨大的作用和潜力。为比较和评估不同树种人工林对土壤碳储量及其稳定性的影响, 本文以广东省阳江市国有花滩林场四种典型人工林为研究对象, 采集1米深度土层的土壤测定其总有机碳(TOC)和易氧化有机碳(ROC)含量及其储量, 并通过土壤易氧化有机碳占总有机碳的比例评估四种林分的土壤碳稳定性。结果发现, 四种林分土壤TOC储量表现为加勒比松 > 马占相思 > 尾叶桉 > 灰木莲, 土壤ROC储量表现为灰木莲 > 加勒比松 > 马占相思 > 尾叶桉, 土壤ROC/TOC比值则表现为灰木莲 > 加勒比松 > 马占相思 > 尾叶桉, 这表明四种林分中, 尾叶桉人工林土壤碳稳定性最高, 灰木莲土壤碳稳定性最低。本研究结果可为评估粤西地区不同树种人工林土壤固碳潜力及其稳定性提供科学数据参考。

关键词

碳储量, 碳稳定性, 易氧化有机碳, 人工林, 粤西

The Characteristic of Soil Carbon Storage of Four Typical Plantations in Huatan National Forestry Farm in Yangjiang City, Guangdong Province, China

Yanlian Li¹, Qifeng Mo^{2*}, Yue Liu², Yuanfu Chen¹, Miaolan Wu², Xiaojuan Gu², Dun Liang¹

¹Guangdong Yangjiang National Huatan Forestry Farm, Yangchun Guangdong

²College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong

Received: Jul. 14th, 2023; accepted: Sep. 20th, 2023; published: Oct. 8th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 黎燕莲, 莫其锋, 刘悦, 陈远富, 吴妙兰, 顾晓娟, 梁顿. 广东省阳江市国有花滩林场四种典型人工林土壤碳储量特征[J]. 林业世界, 2023, 12(4): 203-209. DOI: 10.12677/wjf.2023.124026

Abstract

Plantation plays a great role and potential in forest carbon (C) sink. In order to compare and evaluate the effects of different tree species on soil C storage and its stability, this paper took four typical plantations in the Huatan National Forestry Farm in Yangjiang City, Guangdong Province as research objects, and collected soil at a depth of 1 m to determine the total organic C (TOC) and easily oxidized organic C (ROC) contents and storage, to evaluate the soil C stability of the four stands by the ratios of ROC to TOC. The results showed that the TOC storage of the four stands were *Pinus caribaea* > *Acacia mangium* > *Eucalyptus urophylla* > *Magnolia sumatrana*, the soil ROC storage were *Magnolia sumatrana* > *Pinus caribaea* > *Acacia mangium* > *Eucalyptus urophylla*, and the ROC/TOC ratios were *Magnolia sumatrana* > *Pinus caribaea* > *Acacia mangium* > *Eucalyptus urophylla*. This indicated that the soil C stability of the four stands was the highest in *Eucalyptus urophylla* plantation and the lowest in *Magnolia sumatrana* plantation. The results of this study can provide scientific data reference for evaluating soil C sequestration and its stability in different plantations in western Guangdong.

Keywords

Carbon Storage, Carbon Stability, Readily Oxidizable Organic Carbon, Plantation, Western Guangdong

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国人工林面积的不断扩大,人工林生态系统碳汇功能的提升显得十分重要[1]。人工林碳储量往往受到多种因素的影响,主要包括树种、林龄、土壤、地形、气候和人为管理等因素[2] [3]。其中,人工林固定的碳绝大部分存储在土壤中,因而,土壤碳库是人工林生态系统碳库的重要组成部分。已有对甘肃省5种典型人工林生态系统固碳现状的研究发现,约有80%的碳储存于土壤中,且土壤有机碳储量是生物量碳的3.23倍[4]。对海南省儋州橡胶林和桉树林土壤碳储量的研究发现,随林龄的变化,土壤碳储量占人工林生态系统碳储量的比例变化范围分别为51.58%~85.98%和55.04%~99.46%,说明土壤碳储量对人工林碳汇功能具有决定性作用[5]。

土壤易氧化有机碳(ROC)是土壤总有机碳(TOC)的重要组成部分,是土壤活性有机碳的重要组成部分,对环境变化十分敏感,一般用来表征和判断土壤碳库的稳定性和消长动态。土壤ROC被定义为能被 $333\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KMnO_4 氧化的有机质,其参与土壤中各种化学反应[6]。其中,ROC/TOC的比值可以表征土壤碳稳定性,比值越大,土壤碳稳定性越低[7]。土壤ROC含量的高低主要受到树种差异的影响,尤其是凋落物输入的碳在分解过程中对易氧化有机碳变化的影响十分显著[8]。

阳江市国有花滩林场地处我国热带北缘,是粤西地区重要的人工林分布区域。为探讨不同树种人工林对土壤固碳及其稳定性的影响,本文选择了花滩林场4种典型林分,包括马占相思、加勒比松、灰木莲和尾叶桉人工林,测定土壤有机碳和易氧化有机碳储量及其比值,分析不同林分土壤有机碳稳定性的差异,为人工林土壤固碳提供科学数据支撑。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

试验样地位于广东省阳江市国有花滩林场, 位于广东省西南部, 阳春市境内, 属亚热带季风气候区, 海陆性气候明显, 气候温和。光照时间长, 热量丰富。年平均气温 22℃, 年平均降雨量 2380 mm, 年平均日照达 2000 小时。土壤类型为酸性砖红壤和山地黄壤。本研究选择了花滩林场 4 种典型林分, 包括马占相思(*Acacia mangium*)、加勒比松(*Pinus caribaea*)、灰木莲(*Magnolia sumatrana*)和尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)人工林, 林分具体情况见表 1。四种林分的土壤类型基本相同, 且坡向、坡度基本一致。造林后采取相同的管理措施。四种林分土壤为酸性土壤, pH 变化范围为 4.01~4.30。

Table 1. The basic information of four typical stands in Huatan Forestry Farm

表 1. 花滩林场 4 种典型林分的基本情况

林分类型 Stand types	林龄 Stand ages (a)	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)	林分密度 Stand density (individual/hm ²)	郁闭度 Canopy density (%)
马占相思 <i>Acacia mangium</i>	11	19.15 ± 0.87	15.28 ± 0.30	800 ± 23	30~40
加勒比松 <i>Pinus caribaea</i>	12	17.09 ± 0.46	15.18 ± 0.21	1275 ± 36	60~70
灰木莲 <i>Magnolia sumatrana</i>	12	17.08 ± 0.74	16.56 ± 0.55	1475 ± 32	60~80
尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i>	8	14.54 ± 0.32	16.81 ± 0.27	1525 ± 41	30~40

2.2. 样品采集与测定

在选定的每种林分设置 3 块 20 m × 20 m 的样地进行调查和土壤采样, 样地之间的距离大于 50 m, 在每块样地的对角线上选择 3 处挖掘土壤剖面, 每个剖面划分为 5 个土壤层次(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~100 cm)进行采样, 每份土壤样品采集约 500 g, 带回实验室进行风干过筛处理, 备用。土壤 pH 值用 pH 计测定, 水土比为 2.5:1, 总有机碳(TOC)采用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法测定; 易氧化有机碳(ROC)用 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化, 在 565 nm 波长下进行比色测定[6]。

2.3. 数据分析

不同林分间的显著性差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA, LSD 法进行多重比较), 用 SPSS 19.0 统计软件分析; 绘图用 Origin 2021 软件完成。显著性设为 $p < 0.05$ 。

3. 结果与分析

3.1. 四种林分土壤易氧化有机碳和总有机碳含量

在 4 种林分中, 土壤易氧化有机碳含量(ROC)随着土层的加深而下降。在 0~10 cm, 马占相思的土壤易氧化有机碳显著高于灰木莲和尾叶桉, 也高于加勒比松, 但没有达到统计上的显著差异。在 40~60 cm, 灰木莲的土壤易氧化有机碳显著高于尾叶桉(图 1)。

土壤总有机碳含量(TOC)随着土层的加深也呈现出下降的趋势。在 0~10 cm 土层, 马占相思土壤总有

机碳含量高于其它3种林分,但仅显著高于灰木莲林分;在10~20 cm土层,加勒比松土壤总有机碳显著高于灰木莲,与其它2种林分无显著差异(图1)。

土壤易氧化有机碳占总有机碳的比例(ROC/TOC)可以反映出土壤碳的稳定性情况。在0~10 cm土层,4种林分土壤ROC/TOC值差异不显著,在10~20 cm土层,灰木莲土壤ROC/TOC值显著高于其它3种林分;在60~100 cm,灰木莲土壤ROC/TOC值高于其它3种林分,但仅与加勒比松林分之间存在显著差异(图1)。

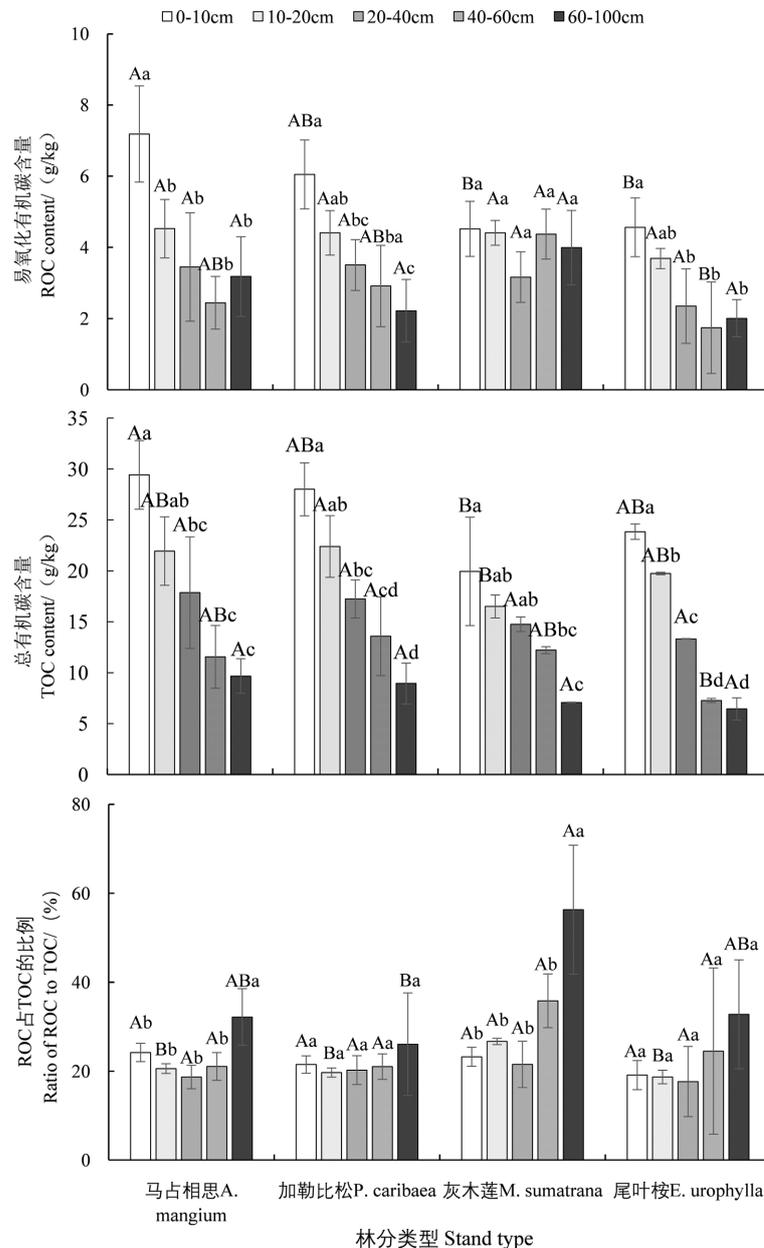


Figure 1. Soil ROC, TOC, and ROC/TOC in four typical stands in Huatan Forestry Farm. Note: Different capital letters indicate significant differences among different stands within the same layers, while different lowercase letters indicate significant differences among different layers within the same stand, $p < 0.05$

图1. 花滩林场4种林分土壤易氧化有机碳、总有机碳含量及其比例。注:图中不同大写字母表示相同土层不同林分类型之间差异显著,不同小写字母表示相同林分不同土层之间差异显著($p < 0.05$)。

3.2. 四种林分土壤易氧化有机碳和总有机碳储量

土壤易氧化有机碳(ROC)储量随土层的加深而呈现出下降趋势。马占相思人工林 0~10 cm 土层的 ROC 储量显著高于 40~60 cm, 而加勒比松人工林 0~10 cm 土层的 ROC 储量则显著高于 60~100 cm 土层, 灰木莲和尾叶桉两种人工林土壤 ROC 储量在各土层间差异不显著。土壤总有机碳(TOC)储量随着土层的加深也呈现出下降趋势。马占相思和加勒比松人工林 0~10 cm 土壤 TOC 储量均显著高于 20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm 土层; 灰木莲人工林 0~10 cm 土层 TOC 储量显著高于 40~60 cm 和 60~100 cm 土层; 而尾叶桉人工林土壤 TOC 储量在 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 4 个土层之间差异显著(表 2)。

Table 2. The vertical distribution of soil ROC and TOC storage in four typical stands of Huatan Forestry Farm
表 2. 花滩林场 4 种典型林分土壤易氧化有机碳和总有机碳储量垂直分布特征

林分类型 Stand type	土层深度/cm Soil depth	土壤 ROC 储量/(t·hm ²) Soil readily oxidized carbon stock	占比/% Percent	土壤 TOC 储量/(t·hm ²) Soil total carbon stock	占比/% Percent
马占相思 <i>Acacia mangium</i>	0~10	12.79 ± 2.49a	30.48	51.76 ± 5.94a	32.54
	10~20	8.44 ± 1.98ab	20.11	38.59 ± 5.93ab	24.26
	20~40	6.99 ± 2.79ab	16.65	31.42 ± 9.64bc	19.75
	40~60	5.77 ± 1.66b	13.74	20.32 ± 5.43c	12.77
	60~100	7.98 ± 3.19ab	19.02	16.99 ± 2.99c	10.68
	0~100	34.13 ± 1.12	100.00	140.76 ± 0.69	100.00
加勒比松 <i>Pinus caribaea</i>	0~10	11.41 ± 2.36a	28.33	49.27 ± 4.59a	31.07
	10~20	8.12 ± 1.06ab	20.16	39.38 ± 5.32ab	24.83
	20~40	7.44 ± 1.37ab	18.46	30.31 ± 3.29bc	19.12
	40~60	7.22 ± 2.12ab	17.92	23.88 ± 6.79cb	15.06
	60~100	6.10 ± 2.41b	15.13	15.72 ± 3.52d	9.92
	0~100	40.29 ± 4.20	100.00	158.57 ± 9.29	100.00
灰木莲 <i>Magnolia sumatrana</i>	0~10	10.96 ± 1.71a	22.75	35.07 ± 9.36a	28.29
	10~20	9.85 ± 1.15a	20.45	29.04 ± 1.99ab	23.42
	20~40	6.87 ± 1.27a	14.27	25.95 ± 1.26ab	20.93
	40~60	10.54 ± 2.72a	21.88	21.48 ± 0.62bc	17.32
	60~100	9.95 ± 3.03a	20.65	12.45 ± 0.06c	10.04
	0~100	48.16 ± 5.15	100.00	123.99 ± 9.87	100.00
尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i>	0~10	9.33 ± 2.64a	30.42	41.93 ± 1.34a	33.76
	10~20	7.51 ± 1.15a	24.50	34.72 ± 0.20b	27.96
	20~40	4.83 ± 2.42a	15.76	23.41 ± 0.07c	18.85
	40~60	4.11 ± 3.27a	13.39	12.79 ± 0.36d	10.30
	60~100	4.88 ± 1.49a	15.93	11.33 ± 1.90d	9.13
	0~100	24.45 ± 0.19	100.00	124.18 ± 0.99	100.00

Note: The different lowercase letters indicate significant differences among different layers within the same stand, $p < 0.05$.
注: 不同小写字母表示同一林分土壤易氧化有机碳和总有机碳在不同土层之间差异显著($p < 0.05$)。

4 种林分土壤易氧化有机碳储量呈现出灰木莲 > 加勒比松 > 马占相思 > 尾叶桉, 而土壤总有机碳储量则为加勒比松 > 马占相思 > 尾叶桉 > 灰木莲。在 0~20 cm 土层, 马占相思和尾叶桉土壤 ROC 储量占 1m 深土层 TOC 储量分别达到 50.59% 和 54.92%, 而在加勒比松和灰木莲两种人工林的比例分别为 48.49% 和 43.20%。在 0~20 cm 土层的 TOC 储量中, 4 种林分的占比均超过 50%, 分别为 56.80%、55.90%、51.71% 和 61.72% (表 2)。

4. 讨论

4.1. 四种典型林分土壤总有机碳储量比较

人工林土壤碳储量受到树种特性的影响, 不同人工林类型碳储量存在明显差异。对我国西北地区人工林的研究结果发现, 云杉人工林生态系统碳储量为 $328.35 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 落叶松人工林为 $277.22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 刺槐人工林为 $70.38 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中土壤碳储量占比高达 76.36% [4]。对海南岛橡胶林和桉树林的研究结果表明, 两种林分土壤碳储量的变化范围分别为 $73.71\% \sim 113.08 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $57.20 \sim 69.10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占生态系统总碳储量的比例分别为 50.59%~85.98% 和 55.4%~94.46%, 同时受到林龄的影响较大[5]。对海南乐东 5 种森林的研究结果发现, 土壤有机碳储量表现出次生林($94.86 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 椰树林($73.72 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 桉树林($44.93 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 大叶相思 > ($30.80 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 木麻黄林($15.10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) [9]。本研究中, 马占相思、加勒比松、灰木莲和尾叶桉 4 种人工林 1 m 深土层有机碳储量分别为 140.76、158.57、123.99 和 $124.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 高于海南岛常见的人工林土壤碳储量[8]。研究表明, 土壤有机碳储量高低取决于累积和分解, 海南岛地区处于热带, 其水热条件十分优越, 土壤有机碳的积累量大, 同时分解量也大, 因而导致碳储量在一定程度上积累相对较低。本研究中, 马占相思人工林具有固氮特性, 其树木生长较快, 对土壤有机碳的输入量较大, 因而土壤有机碳储量高于灰木莲和尾叶桉。而加勒比松作为针叶树种, 其林分郁闭度较高, 凋落物产量大, 导致有机质输入也较大, 因而土壤有机碳储量最大。在表层土壤(0~20 cm)的 TOC 储量中, 4 种林分的占比均超过 50%, 分别为 56.80%、55.90%、51.71% 和 61.72%, 说明本研究的 4 种林分土壤有机碳主要分布在表层, 受到凋落物和根系碳输入的影响较大。

4.2. 四种典型林分土壤碳稳定性特征

根据在土壤中的稳定性的差异, 土壤有机碳一般可以分为活性、缓效和惰性 3 个组分[10] [11]。活性有机碳易被分解和转化, 且能够对外界环境变化响应快速[12]。同时, 土壤易氧化有机碳作为活性碳的重要组成部分, 受到林分类型的显著影响[13]。研究发现, 固氮树种厚荚相思人工林表层土壤 ROC 显著高于非固氮树种, 说明人工林树种的生物学特性差异一定程度上决定了土壤 ROC 变化特征[13]。本研究发现, 马占相思人工林 0~10 cm 土层易氧化有机碳含量高于其它 3 种林分, 但各林分在土壤其它土壤层次间差异不显著, 这说明土壤易氧化有机碳主要集聚在表层, 同时受到林分差异的影响, 这与前人研究结果相一致[8] [14]。一般来说, 土壤 ROC/TOC 比值可以判断出土壤有机碳的稳定性[6] [14]。已有研究发现, 固氮树种厚荚相思纯林表层土壤 ROC/TOC 值小于非固氮树种尾叶桉, 说明厚荚相思纯林土壤碳稳定性更高[14]。本研究发现, 在 0~10 cm 土层, 各林分土壤 ROC/TOC 比值并不显著, 而 10~20 cm 土层灰木莲人工林土壤 ROC/TOC 比值显著高于其它 3 种林分。人工林表层(0~10 cm)土壤的易氧化有机碳可能受到凋落物输入的影响更大, 而 10~20 cm 受到根系碳输入的影响更大, 由于不同树种的凋落物和根系碳输入的差异, 从而导致 4 种人工林土壤 ROC/TOC 比值在不同土壤层次的差异显著。

综上, 本研究 4 种人工林林分中, 土壤总有机碳储量呈现为加勒比松 > 马占相思 > 尾叶桉 > 灰木莲, 而土壤易氧化有机碳储量则呈现为灰木莲 > 加勒比松 > 马占相思 > 尾叶桉, 而 ROC 储量/TOC 储量则表现为灰木莲 > 加勒比松 > 马占相思 > 尾叶桉, 说明尾叶桉土壤碳稳定性最大, 而灰木莲土壤

碳稳定性最小。本研究结果可为阳江市国有花滩林场及粤西地区发展高质量水源林的树种选择提供科学依据和参考。

致 谢

感谢华南农业大学林学与风景园林学院项目组成员及阳江市国有花滩林场项目组成员的通力协作，感谢阳江市国有花滩林场一线职工为本文野外试验采样提供协助。

基金项目

本文得到广东省林业科技创新项目“粤西地区优质高产林分碳封存潜力提升的施肥技术体系构建(2022KJCX017)”的资助。

参考文献

- [1] 魏晓华, 郑吉, 刘国华, 刘世荣, 王伟峰, 刘苑秋, Blanco, A.J. 人工林碳汇潜力新概念及应用[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 3881-3885.
- [2] 李敏. 森林土壤碳储量研究综述[J]. 林业调查规划, 2018, 43(4): 21-24+50.
- [3] 曾伟生, 蒲莹, 杨学云, 易善军. 我国 5 种主要人工林乔木层碳储量生长模型及其气候驱动分析[J]. 林业科学, 2023, 59(3): 21-30.
- [4] 程然然, 关晋宏, 张建国, 何秋月, 邓磊, 侯浩, 李国庆, 杜盛. 甘肃省 5 种典型人工林生态系统固碳现状与潜力[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1112-1120.
- [5] 朱美玲, 王旭, 王帅, 王文蕾, 邹耀进, 梁卿雅. 海南儋州橡胶树、桉树人工林碳储量及其动态变化[J]. 生态科学, 2016, 35(3): 43-51.
- [6] 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 方晰. 中亚热带土地利用方式对土壤易氧化有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 911-919.
- [7] 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.
- [8] 王军广, 赵志忠, 王鹏, 吴雯, 吴慧. 海南岛东南部热带雨林土壤易氧化有机碳特征及影响因素[J]. 西部林业科学, 2023, 52(2): 106-112+131.
- [9] 邢维奋, 石珊奇, 薛杨, 王小燕, 林之盼. 海南乐东 5 种森林土壤有机碳储量的比较[J]. 热带农业科学, 2017, 37(5): 14-19.
- [10] 张雪莹, 陈小梅, 危晖, 林媚珍. 城市化对珠江三角洲存留常绿阔叶林土壤有机碳组分及其碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 184-190.
- [11] Yu, P., Li, Y., Liu, S., Liu, J., Ding, Z., Ma, M. and Tang, X. (2022) Afforestation Influences Soil Organic Carbon and Its Fractions Associated with Aggregates in a Karst Region of Southwest China. *Science of The Total Environment*, **814**, Article 152710. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152710>
- [12] Hu, Q., Thomas, B.W., Powlson, D., Hu, Y., Zhang, Y., Jun, X., Shi, X. and Zhang, Y. (2023) Soil Organic Carbon Fractions in Response to Soil, Environmental and Agronomic Factors under Cover Cropping Systems: A Global Meta-Analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **355**, Article 108591. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108591>
- [13] Wang, L., Luo, N., Shi, Q. and Sheng, M. (2023) Responses of Soil Labile Organic Carbon Fractions and Enzyme Activities to Long-Term Vegetation Restorations in the Karst Ecosystems, Southwest China. *Ecological Engineering*, **194**, Article 107034. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107034>
- [14] 顾晓娟, 于耀泓, 刘悦, 吴梦佳, 刘林云慧, 莫其锋. 华南典型人工林对土壤易氧化有机碳的影响[J]. 森林与环境学报, 2023, 43(2): 145-151.