



赵秀婷, 辉朝茂, 朱书红, 等. 土壤有机质含量及其红外光谱特征对甜龙竹不同种植年限的响应[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(6): 1448–1456.

ZHAO X T, HUI C M, ZHU S H, et al. Response of soil organic matter content and its infrared spectral characteristics to different planting durations of *Dendrocalamus brandisii*[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(6): 1448–1456.

土壤有机质含量及其红外光谱特征 对甜龙竹不同种植年限的响应

赵秀婷, 辉朝茂, 朱书红, 刘蔚漪*, 蔡春丽, 张文君, 涂丹丹, 朱礼月

(西南林业大学 林学院 竹藤科学研究院/丛生竹工程技术研究中心, 云南 昆明 650224)

摘要:【目的】土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标,是农林生态系统中植物速效养分的源泉,对生产力的高低及其稳定性有决定性作用,而有机质的分解速率与其化学结构密切相关。因此对有机质化学结构进行表征和量化估算,对充分认识有机质的转化循环具有重要意义。【方法】为探究种植年限及土层深度对有机质含量及其官能团含量的影响,探讨不同种植年限下有机质结构稳定性的差异。文章以不同种植年限(5, 10, 20, 40 a)甜龙竹林土壤为研究对象,采用傅里叶红外光谱对林下土壤有机质(SOM)结构进行表征及半定量分析。【结果】(1)随着种植年限的延长,有机质含量增加,种植年限为10、20、40 a有机质含量显著高于5 a。(2)不同种植年限有机质官能团种类一致,主要为:来源于糖类($1\ 011+1\ 031+1\ 089\text{ cm}^{-1}$)、芳香族($1\ 634\text{ cm}^{-1}$)、脂肪族($2\ 858+2\ 925\text{ cm}^{-1}$)、醇酚($3\ 445+3\ 621+3\ 694\text{ cm}^{-1}$),但不同种植年限下各特征峰拟合面积和相对强度差异显著,40 a比5 a的甜龙竹林土壤有机质糖类、芳香族、脂肪族化合物特征峰拟合面积分别提高58.56%、29.56%、9.50%,醇酚下降47.83%,特征峰相对强度分别提高54.37%、24.66%、8.42%,醇酚物质相对峰强度下降47.09%。(3)有机质稳定性随着种植年限的延长,0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm 3层土壤稳定性逐渐趋于一致,说明长期种植甜龙竹有利于化学结构复杂、难分解物质积累进入深层土。【结论】甜龙竹种植年限延长有利于土壤有机质含量积累,并使有机质结构趋于芳香化、脂肪化,增加糖类化合物含量,提高有机质化学结构稳定性。

关键词:甜龙竹;种植年限;土壤有机质;官能团;红外光谱

中图分类号:S153.6*21 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2022)06-1448-09

Response of Soil Organic Matter Content and Its Infrared Spectral Characteristics to Different Planting Durations of *Dendrocalamus brandisii*

ZHAO Xiuting, HUI Chaomao, ZHU Shuhong, LIU Weiyi*,
CAI Chunli, Zhang Wenjun, Tu Dandan, Zhu Liyue

(College of Forestry, Institute of Bamboo and Rattan/Engineering Research Center of Sympodial Bamboo, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

收稿日期:2022-06-10 修回日期:2022-08-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2200501)和云南省基础研究专项(202201AT070053)

Project supported by the Supported by the National Key Research and Development Plan(2021YFD2200501) and Yunnan Provincial Basic Research Project(202201AT070053)

作者简介:赵秀婷, orcid.org/0000-0003-0443-1708, 1943429511@qq.com; *通信作者:刘蔚漪, 副教授, 博士, 主要从事竹藤培育、生态研究, orcid.org/0000-0001-7115-8030, weiyiliu651@126.com。

Abstract: [Objective] Soil organic matter is an important index to measure soil fertility and the source of plant available nutrients in the agroforestry ecosystem. It plays a decisive role in the level and stability of productivity, and the decomposition rate of organic matter is closely related to its chemical structure. Therefore, the characterization and quantitative estimation of the chemical structure of organic matter are of great significance to fully understand the transformation cycle of organic matter. [Methods] In order to explore the effects of planting durations and soil depth on the content of organic matter and its functional groups, as well as the differences of structural stability of organic matter under different planting durations, the structure of soil organic matter (SOM) under *D. brandisii* forest with different planting durations (5, 10, 20, 40 a) was semi-quantitatively analyzed by Fourier infrared spectroscopy. [Results] This study found that: (1) with the extension of planting durations, the content of organic matter increased, and the content of organic matter in 10 a, 20 a and 40 a was significantly higher than that in 5 a. (2) The functional groups of organic matter in different planting durations were the same, mainly including sugars ($1\ 011+1\ 031+1\ 089\text{ cm}^{-1}$), aromatic ($1\ 634\text{ cm}^{-1}$), aliphatic ($2\ 858+2\ 925\text{ cm}^{-1}$), alcohols and phenols ($3\ 445+3\ 621+3\ 694\text{ cm}^{-1}$), but the fitting area and relative intensity of each characteristic peak were significantly different under different planting durations. The fitting areas of characteristic peaks of sugars, aromatic and aliphatic compounds in soil organic matter of *D. brandisii* forest in 40a were 58.56%, 29.56% and 9.50% higher than those of 5 a, phenols and alcohols were 47.83% lower, and the relative intensity of characteristic peaks was 54.37%, 24.66% and 8.42% higher, the relative peak intensity of alcohols and phenols decreased by 47.09%. (3) With the extension of planting durations, the stability of organic matter in the three layers of 0–20 cm, 20–40 cm and 40–60 cm gradually tended to be consistent, indicating that the long-term planting of *D. brandisii* was conducive to the accumulation of complex chemical structure and refractory substances into the deep soil. [Conclusion] The extension of planting durations of *D. brandisii* is beneficial to the accumulation of organic matter content, the aromatization and fatty structure of soil organic matter, the increase of carbohydrate content and the stability of organic matter chemical structure.

Keywords: *Dendrocalamus brandisii*; planting durations; soil organic matter; functional groups; infrared spectrum

【研究意义】土壤有机质(SOM)是用于评估土壤肥力和养分可用性的重要指标,其分解与转化对土壤的养分循环与能量传递具有重要意义^[1]。安显金等^[2]认为未来土壤有机质的研究重点应放在有机质结构和性质、环境污染、农业生态系统3方面,但有机质内部结构复杂多样,传统的结构研究手段需要对有机质进行提取,这对有机质的原结构产生了影响^[3]。傅里叶红外光谱技术是目前研究有机质的重要手段之一,具有高效、无损、清洁和适用范围广等特点^[4]。甜龙竹(*Dendrocalamus brandisii*)是笋材两用的优良竹种,具有重要的开发利用价值,是我国的优良竹种^[5],主要分布于滇南地区的保山、玉溪、西双版纳、普洱等地,在缅甸、越南、泰国等东南亚国家也有分布^[6]。具有生长迅速、成林快、笋期长、产量高、营养丰富等优点,还具有涵养水源、保持水土、美化环境等极好的生态效益^[7]。种植甜龙竹是云南省农户的传统习惯,目前甜龙竹的产业化开发是云南省乡村的特色产业项目,甜龙竹逐渐规模化、产业化^[8],由此产生的生态效益也日益成为人们关注的焦点。【前人研究进展】Kavdir等^[9]通过红外光谱研究发现,脂肪族、芳香族、碳水化合物是有机质的主要组成结构,同时,Lehmann等^[10]在后续研究中发现,有机质中脂肪族和羧基中的碳因其更易吸附在矿物表面从而达到增强有机质的稳定性的效果。从化学角度看,脂肪类、芳香类、酚类物质等都为难分解物质,在有机质中占比越高有机质稳定性越好,而糖类小分子物质易分解,在杨传宝等^[11]研究中发现,糖类物质占比越小,稳定的有机大分子增加,有利于土壤中有有机无机复合体结构的形成。Artz等^[12]利用FTIR分析5个欧洲国家土壤发现不同来源土壤有机质结构与有机组分不同。张福韬等^[13]对长期种植玉米的土壤有机质研究发现长期连作玉米后土壤有机质结构逐渐脂肪化与简单化,稳定性降低。李国栋等^[14]分析了不同种植年限下雷竹林土壤的有机质,发现雷竹林经营中有机质可被有效固定在土壤固碳方面具有一定的意义;杨传宝^[15]应用傅里叶红外光谱研究发现不同经营措施对

土壤有机碳的化学结构具有显著影响,认为人为干扰较少的毛竹林土壤有机碳中酚醇、脂肪族、芳香族吸收峰相对强度增强。【本研究切入点】我国对有机质的研究起步晚,竹类研究也主要集中在雷竹与毛竹等散生竹类中,而对于丛生竹特别是大型丛生竹土壤有机质的研究甚少。【拟解决的关键问题】本研究以不同种植年限甜龙竹林为研究对象,以空间尺度代替时间尺度,运用傅里叶红外光谱仪,明确长期种植甜龙竹后有机质含量及结构的变化,探究长期种植甜龙竹对土壤有机质变化及其稳定性的影响,以期为甜龙竹林的可持续利用以及揭示有机质化学稳定机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自云南省普洱市澜沧县竹塘乡东主村(22°39′~22°43′N,99°52′~99°59′E),海拔1 630 m,该地属亚热带山地季风湿润气候,年平均气温20℃,年降水量1 830 mm左右,生长期年平均340 d,无霜期年平均343 d,年平均日照时数1 750 h,属于适宜甜龙竹生长的区域。

1.2 样品采集

本试验土样于2021年7月采集,选择成土母质相同、位置相对集中且管理措施均为粗放经营的甜龙竹林(5,10,20,40 a)土壤为采样对象,4个种植年限甜龙竹林管理方式一致,人为干扰少,且均已不再进行采笋操作。采样点设在竹丛边缘垂直下方,移除土壤上层凋落物和腐殖质层,分别采集0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层样品,共计60个土壤样品。各土层取5点土样混合,采用4分法,保留1 kg土样,经风干研磨后装袋保存。不同种植年限甜龙竹采样点基本概况见表1。

1.3 分析方法

1.3.1 红外光谱分析 采用KBr压片法,扫描范围4 000~400 cm⁻¹,分辨率4 cm⁻¹,扫描32次。

1.3.2 有机质稳定性计算

$$\text{有机质稳定性}^{[16]} = \frac{\text{不易分解官能团特征峰面积}}{\text{易分解官能团特征峰面积}} = \frac{S_{1634} + S_{2858} + S_{2925}}{S_{1011} + S_{1031} + S_{1089} + S_{3445} + S_{3621} + S_{3694}} \quad (1)$$

式(1)中, S_x 代表对应波长官能团的拟合峰面积。

1.4 数据处理

采用OMNIC(9.2)软件对红外光谱图像进行透过率和吸光度转换,以及进行图像光滑和基线校准;采用Origin(2021)进行寻峰并拟合计算峰面积,绘制相关图表,采用Excel(2016)对数据进行整理。

表1 不同种植年限甜龙竹采样点的基本概况

Tab.1 Basic overview of the sampling sites in different planting durations

种植年限/a	海拔/m	平均树高/m	平均胸径/cm	秆数/trees	丛径/m
Planting	Altitude	Average height	Average diameter	Number of trees	Cluster path
5	1 591	7.94	6.9	5	0.93
10	1 576	9.80	11.64	10	1.74
20	1 615	13.33	10.49	19	2.70
40	1 581	15.60	12.98	24	2.92

2 结果与分析

2.1 不同种植年限下有机质含量变化

由图1可知,不同种植年限对有机质含量的影响差异显著。在0~20 cm土层中,5 a、40 a与10 a、20 a差异显著,10 a的有机质含量最高,为26.52 g/kg,比5 a的增加13.04%;在20~40 cm土层中,不同种植年限有机质含量之间差异不显著;在40~60 cm土层中,5 a与10,20,40 a差异显著,以40 a有机质含量最高,为26.64 g/kg,比5 a的有机质含量增加了46.86%。说明随种植年限的延长,有机质含量有上升趋势。甜龙竹种植后人为干扰较少,有机质主要来源于竹林凋落物和竹蔸,在10 a时,竹林正处于生长壮林龄阶段,故各项指标较高,继续延长种植年限浅层土有机质上升趋势减慢,主要在深层土积累。同一种植年限,不同土层之间,前3个种植年限有机质含量为浅层土高于深层土,在种植年限为40 a时,深层土有

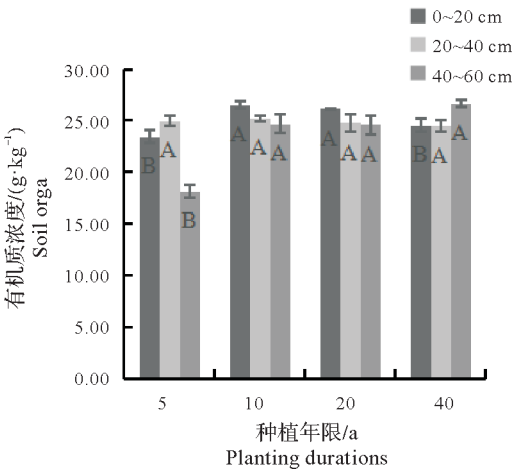
机质含量高于浅层土,是浅层土的108.42%,说明随着种植年限的延长,浅层土有机质进入深层土,深层土有机质不断积累。

2.2 不同种植年限有机质化学结构差异

由图2可知,不同种植年限甜龙竹土壤红外光谱特征峰相似,说明不同种植年限有机质官能团种类相似。主要在3 694,3 621,3 445,2 925,2 858,1 634,1 432,1 089,1 031,1 011,916,797,778,694,472 cm⁻¹处。根据特征峰的归属^[17],得到3 694 cm⁻¹和3 445 cm⁻¹是羧酸、碳水化合物和苯酚中-OH伸缩振动,和氨基酸中的N-H振动,且913 cm⁻¹为3 621 cm⁻¹的变形振动频率,1 634 cm⁻¹为3 445 cm⁻¹的变形振动频率,同时也有来源于芳香族的酰胺C=O;2 925 cm⁻¹和2 858 cm⁻¹吸收峰来源于脂肪中的CH₂和CH₃;1 089 cm⁻¹的吸收峰来源于糖类的C-OH振动;1 031 cm⁻¹和1 011 cm⁻¹来源于多糖的C-O和Si-O-Si;其中472 cm⁻¹是Si-O-Si的变形振动频率;797 cm⁻¹和778 cm⁻¹是Si-O的伸缩振动;694 cm⁻¹来源于=C-H的振动^[18]。长期种植甜龙竹土壤有机质化学官能团种类相似,但特征峰面积发生改变,前人研究发现,FITR特征峰的面积与官能团含量成正比^[19]。本实验用1 011、1 031、1 089 cm⁻¹吸收峰的面积之和代表糖类,1 634 cm⁻¹的面积代表芳香族官能团的含量,2 925 cm⁻¹和2 854 cm⁻¹代表脂肪族,3 694、3 621、3 445 cm⁻¹3个峰的面积之和代表醇酚。

由图3和表2可知,在0~20 cm土层中,糖类特征峰的面积40 a和5,10,20 a差异显著,种植40 a(最高)的甜龙竹糖类特征峰面积是种植20 a(最低)的206.83%,芳香族特征峰的面积5 a>40 a>10 a>20 a,其中5 a与10 a、20 a差异显著,与40 a差异不显著,脂肪族的特征峰面积不同年限之间差异不显著;醇酚特征峰面积5 a与10,20,40 a差异显著,面积大小为5 a>40 a>20 a>10 a。在20~40 cm土层中,糖类特征峰面积10 a与5,20,40 a差异显著,种植10 a(面积最大)比种植5 a(面积最小)增长了74.14%;芳香族特征峰面积不同种植年限之间差异显著,为10 a>5 a>40 a>20 a。脂肪族特征峰面积20 a与5,10,40 a差异显著,种植40 a(面积最大)比种植20 a(面积最小)增长了147.14%;醇酚特征峰面积5 a与10,20,40 a差异显著,种植10 a(面积最小)比种植5 a(面积最大)降低了65.20%。在40~60 cm土层中,不同种植年限糖类特征峰面积差异显著,10 a>40 a>20 a>5 a,种植40 a比5 a提高了23.06%。芳香族以40 a特征峰面积最大,5 a面积最小,40 a比5 a增大了98.33%,脂肪族特征峰面积以40 a最大,醇酚特征峰面积5 a>40 a>20 a>10 a。

在同一年限不同土层,5 a时,随着土层加深,糖类、脂肪族、醇酚特征峰面积逐渐增大,芳香族面积逐渐减小;10 a时,糖类、脂肪族、醇酚特征峰逐渐增大,芳香族先增大后减小;20 a时,糖类、脂肪族醇酚特征峰面积逐渐增大,芳香族先增大后减小;40 a时糖类、芳香族、脂肪族、醇酚特征峰面积逐渐增大。说明种植年限对有机质官能团的含量有显著影响,且土层的深度也会造成有机质各官能团含量的不同。



不同大写字母表示不同年限差异显著(P<0.05)。
Different capital letters indicate significant difference in different years (P<0.05).

图1 甜龙竹不同种植年限有机质含量

Fig.1 Organic matter content of *D. brandisii* in different planting durations

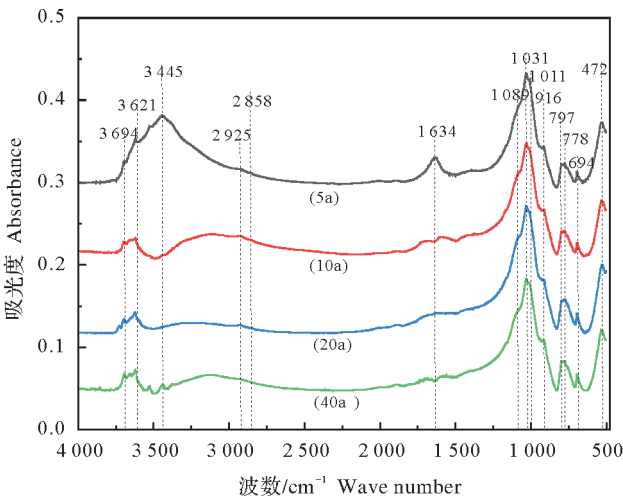


图2 甜龙竹不同种植年限红外光谱图

Fig.2 FTIR of the different planting durations of *D. brandisii*

说明种植年限对有机质官能团的含量有显著影响,且土层的深度也会造成有机质各官能团含量的不同。

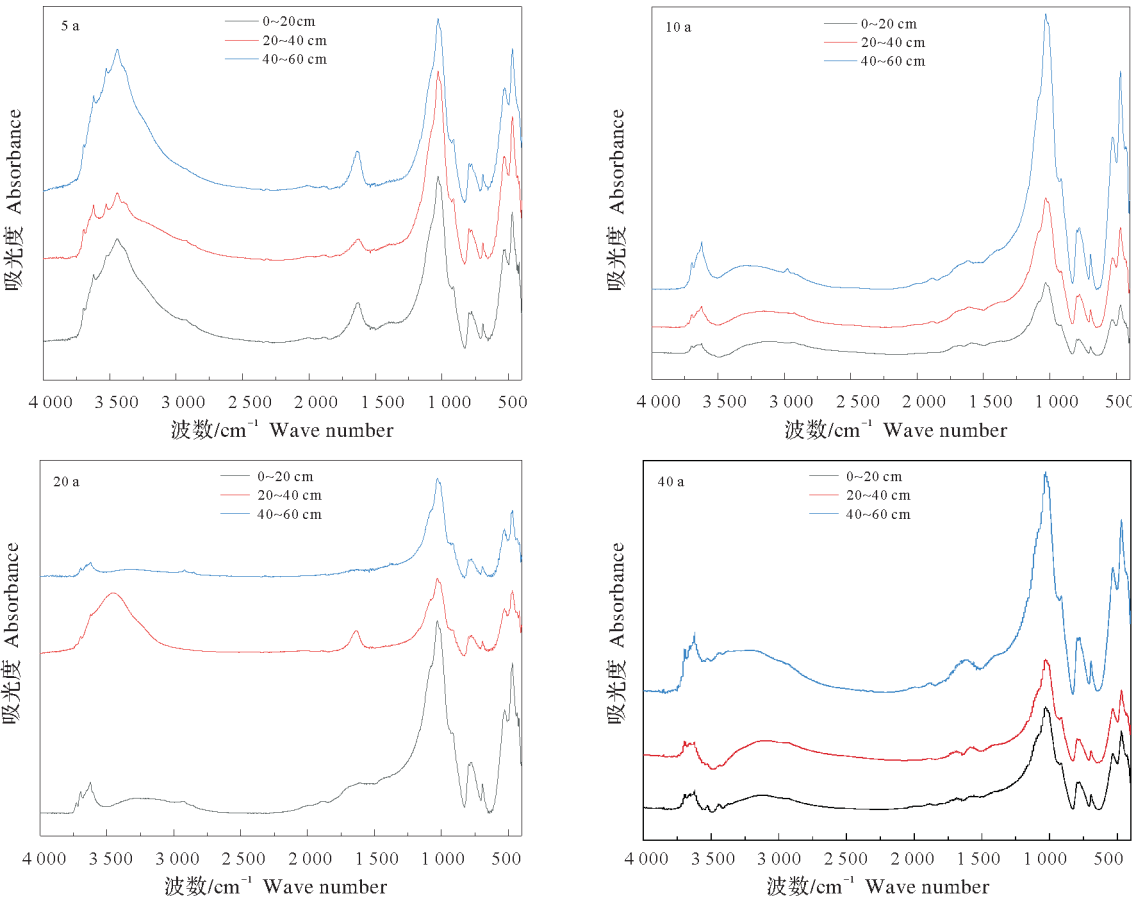


图3 不同种植年限各土层红外光谱

Fig.3 FTIR of each soil layer at different planting durations

Tab.2 Characteristic peak fitting area of each soil layer in different planting durations					
土层深度/cm	种植年限/a	糖类	芳香族	脂肪族	酚醇
Soil depth	Planting years	Polysaccharide	Aromatic	Aliphatic	Alcohol
		(1 011+1 031+1 089)cm ⁻¹	1 634 cm ⁻¹	(2 858+2 925)cm ⁻¹	(3 445+3 621+3 694)cm ⁻¹
0~20	5	28.87±4.82 ^B	8.34±0.80 ^A	4.21±0.78 ^A	37.42±2.69 ^A
	10	29.78±1.91 ^B	5.95±0.35 ^B	4.45±0.21 ^A	13.82±0.81 ^B
	20	28.25±2.68 ^B	5.37±0.40 ^B	2.98±0.55 ^A	15.12±3.01 ^B
	40	58.43±9.78 ^A	8.00±1.01 ^{AB}	4.07±0.76 ^A	19.59±3.82 ^B
20~40	5	41.11±5.37 ^B	7.54±0.22 ^B	4.39±0.37 ^A	48.96±2.41 ^A
	10	71.59±6.46 ^A	11.35±1.25 ^A	4.83±0.61 ^A	17.04±1.19 ^B
	20	43.50±1.26 ^B	4.51±0.51 ^C	2.10±0.07 ^B	21.12±3.45 ^B
	40	51.21±3.71 ^B	7.12±0.38 ^B	5.19±0.35 ^A	22.78±0.25 ^B
40~60	5	50.05±6.19 ^B	5.39±0.35 ^B	6.24±0.63 ^A	53.21±2.60 ^A
	10	99.53±8.47 ^A	10.64±0.91 ^A	5.60±1.05 ^A	27.14±0.65 ^B
	20	57.27±5.35 ^B	6.71±0.32 ^A	5.60±0.16 ^B	29.16±0.76 ^B
	40	74.43±2.84 ^{AB}	10.69±0.53 ^A	7.09±0.59 ^A	30.66±1.25 ^B

不同大写字母表示不同年限差异显著($P<0.05$)。

Different capital letters indicate significant difference in different years ($P<0.05$).

2.3 种植年限对有机质特征峰相对峰强度的影响

不同种植年限各土层有机质特征峰相对峰强度的影响差异显著。表3表明,糖类拟合面积最大,说明多糖是有机质的主要组成成分。随着种植年限的延长,糖类、芳香族、脂肪族的相对峰强度均有所上

升,酚醇呈下降趋势。在0~20 cm土层中,种植年限40 a的甜龙竹林土壤糖类化合物最高,芳香族和脂肪族相对峰强度在10 a时最高,醇酚在40 a时最低;在20~40 cm土层中,糖类和芳香族相对峰强度在10 a最高,40 a糖类化合物比5 a高48.16%,脂肪族化合物相对峰强度在40 a最高,醇酚化合物在10 a最低。在40~60 cm土层中,糖类化合物和醇酚相对峰强度分别在10 a最高和最低,芳香族化合物和脂肪族化合物相对峰强度40 a最高,比5 a分别提高79.19%、2.91%。

表3 不同种植年限各土层特征峰相对峰强度
Tab.3 Relative peak strength of characteristic peaks of each soil layer in different planting durations

土层深度/cm Soil depth	种植年限/a Planting years	糖类/% Polysaccharide (1 011+1 031+1 089)cm ⁻¹	芳香族/% Aromatic 1 634 cm ⁻¹	脂肪族/% Aliphatic (2 858+2 925)cm ⁻¹	酚醇/% Alcohol (3 445+3 621+3 694)cm ⁻¹
0~20	5	36.14±2.62 ^C	10.70±1.11 ^A	5.44±1.16 ^A	47.71±1.58 ^A
	10	55.05±1.52 ^B	11.06±0.83 ^A	8.28±0.64 ^A	25.63±1.36 ^B
	20	54.59±1.50 ^B	10.69±1.71 ^A	6.03±1.62 ^A	28.69±3.06 ^B
	40	64.75±1.90 ^A	9.01±0.40 ^A	4.55±0.45 ^B	21.68±1.39 ^C
20~40	5	39.95±2.49 ^C	7.46±0.47 ^B	4.37±0.56 ^A	48.23±1.87 ^A
	10	68.21±0.88 ^A	10.77±0.35 ^A	4.62±0.45 ^{AB}	16.41±1.33 ^C
	20	61.22±3.11 ^{AB}	6.37±0.86 ^C	2.95±0.12 ^B	29.46±4.05 ^B
	40	59.19±1.87 ^B	8.25±0.11 ^B	6.06±0.64 ^B	26.50±1.34 ^B
40~60	5	43.28±1.73 ^C	4.71±0.09 ^B	5.44±0.42 ^A	46.58±1.57 ^A
	10	69.47±1.39 ^A	7.48±0.58 ^A	3.88±0.53 ^B	19.17±1.35 ^B
	20	62.24±5.29 ^{AB}	8.69±0.55 ^A	3.94±0.39 ^B	25.13±4.90 ^B
	40	58.77±0.58 ^B	8.44±0.20 ^A	5.60±0.47 ^A	27.18±0.06 ^B

2.4 不同种植年限对有机质稳定性的影响

如图4,不同种植年限之间有机质稳定性差异显著。在0~20 cm土层中,稳定性排序为10 a>20 a>5 a>40 a,10 a有机质稳定性最高,比5 a提高26.32%;在20~40 cm土层中,种植10 a与40 a的有机质稳定性显著高于5 a、20 a,整体呈现先升高再降低再升高的趋势;在40~60 cm土层中,有机质稳定性随着种植时间的延长而逐渐上升,且40 a与5,10,20 a差异显著,种植40 a(稳定性最高)比5 a有机质稳定性提高了45.45%。在同一种植年限不同土层中,前3个种植年限,3层土的有机质结构稳定性差异显著,在40 a时,3层土稳定性趋于一致。说明,随着种植年限的延长,浅层土的易分解有机质分解,难分解有机质相对积累并随时间推移进入深层土,与有机质含量变化一致。

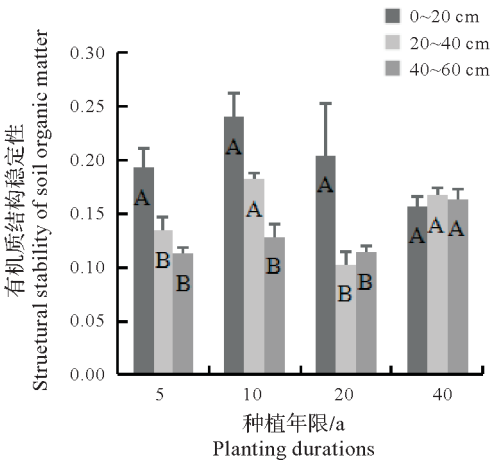


图4 甜龙竹不同种植年限有机质结构稳定性
Fig.4 Structural stability of organic matter in different planting durations of *D. brandisii*

3 讨 论

3.1 种植年限对有机质含量及其稳定性的影响

林龄、土壤类型、营林措施等是影响有机质的主要因素^[20]。文章研究表明,长期种植甜龙竹有利于有机质含量的增加,但随着种植年限的延长,3层土壤中有机质含量变化趋势不一致。造成该有机质变化趋势的原因可能是在甜龙竹种植年限较短时,甜龙竹生长成林需要土壤提供养分,造成土壤中有机质含量降低,因种植时间短,竹苑较小,提供有机质的土壤主要为浅层土,对20~40 cm和40~60 cm土层中有机质含量影响较小,当甜龙竹长成,凋落物增多,造成0~20 cm土层有机质含量上升,又因甜龙竹竹苑主要生长区在0~40 cm,40 cm以下土壤有机质积累大于消耗,造成40~60 cm土层有机质含量持续上升。结合有机质稳定性来看,有机质的抗分解能力取决于两方面,一是凋落物植物残体的化学成分,二是有

机质化学自身结构的抗降解性^[21]。试验中,3层土有机质稳定性的变化趋势与有机质含量变化趋势基本一致。该研究在丛生竹中较少,但在散生竹中有类似结果,杨传宝^[15]研究发现长期种植毛竹,土壤中碳的积累和化学稳定得到提升。说明竹类种植不管是散生竹还是丛生竹都能显著提高土壤的固碳能力,增强有机质的化学稳定性。

3.2 种植年限对有机质特征峰面积的影响

由于植物的生长发育伴随着有机质含量的增加和微生物群落组成的变化,土壤有机质的化学特征可能随着时间的变化而变化^[22]。本研究中,不同种植年限的土壤有机质官能团组成基本相同,但特征峰面积有显著差异。该结论与人为干扰(施肥、耕作方法、秸秆还田等)对土壤有机质结构的结果相同^[23-25]。说明土壤有机质主要由糖类、碳水化合物、脂肪族、芳香族组成,但官能团数量却差异显著。研究发现,在3层土中,来源于糖类、芳香族、脂肪族官能团数量均有上升再下降的趋势,但总体种植40 a的甜龙竹土壤3个物质的特征峰面积均高于5 a,说明长期种植甜龙竹既增加了土壤有机质,又增加了有机质中的活性物质,提高了土壤的脂肪性。其原因可能是长期种植甜龙竹会引起微生物数量的增加,其残体因由肽聚糖等成分组成,造成该3类物质增加^[26],也有来源于增加的易分解有机质,使其脂肪族,芳香族相对积累^[11]。来源于醇酚的官能团数量随种植年限延长下降,在种植年限40 a显著低于5 a的甜龙竹林,该研究结果与常汉达等^[27]弃耕地开垦前后醇酚的变化趋势结果相反。原因有两方面,一是甜龙竹对醇酚类等有机物需求大,造成来源于醇酚的官能团含量降低,二是降低的醇酚特征峰的面积有可能是来源于水的羟基振动减小,也就是由土壤含水量引起醇酚的官能团含量降低^[13]。长期种植甜龙竹,造成有机质含量升高,微生物将糖类和碳水等物质快速分解,使其芳香族和脂肪族物质长期相对积累,从而提高了有机质的稳定性。同时芳香族和脂肪族等有机物的积累,造成土壤大量难分解化学物质富集,对微生物群落、功能具有负面影响,降低了微生物对有机质的分解速率,更加有利于土壤的固碳功能^[28-29]。

3.3 种植年限对有机质特征峰相对峰强度的影响

长期种植甜龙竹林糖类特征峰相对强度随着种植年限延长逐渐增加,表明种植甜龙竹有利于土壤糖类化合物的积累,该研究结果与张福韬等^[13]的研究结果相似,与常汉达等^[25]结果相反。原因可能是因为甜龙竹与张福韬所研究的玉米残体中均富含大量的糖类物质,造成微生物的分解速率小于土壤凋落物中糖类的积累,使其糖类特征峰相对强度增大;反之,棉花中糖类总量低于甜龙竹,凋落物在土壤中分解,该化合物消耗大于积累,使其与甜龙竹研究结果相反。芳香族特征峰相对强度随着种植年限的延长,深层土中芳香化合物得到积累,芳香物质因其含有稳定的苯环结构造成微生物分解过程中难以分解,而甜龙竹林凋落物中木质素是芳香化合物的主要来源,该结论与李雯^[30]研究毛竹有机碳结构的结果一致。脂肪族特征峰相对强度在20~40 cm和40~60 cm土层中随着种植年限先减小再增大,Wang等^[31]认为脂肪族物质在短期腐解过程中是属于易分解化合物,而在长期试验中前人研究发现脂肪族化合物属于顽抗性物质^[7,13,26],本文研究结果与该结论相同,在短期种植时脂肪族特征峰相对强度降低,种植40 a时升高,这表明短期种植甜龙竹的土壤中易分解的脂肪族化合物随着种植年限被微生物分解,土壤中留下结构更为复杂的脂肪族化合物从而积累。

4 结 论

种植年限对有机质含量有显著影响,随着种植年限的延长,有机质含量上升,种植10,20,40 a有机质含量显著高于种植5 a;不同种植年限甜龙竹土壤有机质官能团种类基本一致,但各特征峰面积及其相对强度差异显著,长期种植甜龙竹能够显著增加来源于糖类、脂肪族、芳香族、碳水化合物官能团含量,土壤稳定性随着种植年限的延长,3层土(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm)稳定性趋于一致。以上研究表明,甜龙竹的种植有利于提高土壤中有机质的芳香化、脂肪化程度,使其土壤有机质结构趋于复杂化,从而提高有机质稳定性。

致谢:“云南滇南竹林生态系统定位观测研究站”监测经费资助项目(2022-YN-15),西南林业大学竹藤科学研究院运行经费资助项目,中国国家留学基金项目(20107855018)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 于文睿南,潘畅,郭佳欢,等.杉木人工林表土有机质含量及其对土壤养分的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(11):1931-1939.
YUWEN R N, PAN C, GUO J H, et al. Topsoil organic matter and its effect on the soil nutrients contents of *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2021, 29(11): 1931-1939
- [2] 安显金,李维.国际土壤有机质研究概况和趋势:基于文献计量学分析[J].土壤通报,2020,51(2):404-415.
AN X J, LI W. A review of international soil organic matter research-based on bibliometric analysis[J]. Chinese journal of soil science, 2020, 51(2): 404-415
- [3] 朱仁欢.不同植茶年限土壤团聚体有机质组分及其结构特征研究[D].成都:四川农业大学,2018.
ZHU R H. Study on the distribution and structural characteristics of soil organic matter fractions within soil aggregates of tea plantations with different ages[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2018.
- [4] 何牡丹,李志忠,刘永泉.土壤有机质研究方法进展[J].新疆师范大学学报(自然科学版),2007,26(3):249-251
HE M D, LI Z Z, LIU Y Q. Progress in research methods for soil organic matter[J]. Journal of Xinjiang normal university (natural science edition), 2007, 26(3): 249-251
- [5] 尹昭勇,王慷林,李莲芳,等.施肥和解淀粉芽孢杆菌对勃氏甜龙竹分株扩繁萌蘖和生长的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2012,27(5):751-755.
YIN Z Y, WANG K L, LI L F, et al. Effects of fertilization and bacillus amyloliquefaciens on numbers with growth parameters of new bamboo ramets of *Dendrocalamus brandisii* [J]. Journal of Yunnan agricultural university (natural sciences), 2012, 27(5): 751-755.
- [6] 刘必龙,郭正云,陈浩,等.云南优良甜龙竹种质资源及其保护策略[J].世界竹藤通讯,2013,11(2):22-26.
LIU B L, GUO Z Y, CHEN H, et al. A study of germplasm resources of *Dendrocalamus brandisii* and its conservation strategy in Yunnan, China[J]. World bamboo and rattan, 2013, 11(2): 22-26
- [7] 万晓丽,谢凤瑞,赵云晋,等.临沧甜龙竹笋用林栽培实用技术[J].绿色科技,2020(7):100-101.
WANG X L, XIE F R, ZHAO Y J, et al. Practical technique of *Dendrocalamus brandisii* forest cultivation[J]. Journal of green science and technology, 2020(7): 100-101.
- [8] 辉朝茂,何霞红,刘蔚漪,等.推进甜龙竹资源产业化开发助推乡村振兴[J].世界竹藤通讯,2022,20(1):66-69.
HUI C M, HE X H, LIU W Y, et al. Promoting the development of *Dendrocalamus brandisii* industry for rural vitalization[J]. Journal of green science and technology, 2022, 20(1): 66-69.
- [9] KAVDIR Y, EKINCI H, YQKSEL O, et al. Soil aggregate stability and ^{13}C CP/MAS-NMR assessment of organic matter in soils influenced by forest wildfires in Çanakkale, Turkey[J]. Geoderma, 2005, 129: 219-229.
- [10] LEHMANN J, KINYANGI J, SOLOMON D. Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(1): 45-57.
- [11] 杨传宝,倪惠菁,苏文会,等.经营措施对毛竹林土壤不同组分有机碳、氮及化学结构的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):25-34.
YANG C B, NI H J, SU W H, et al. Effects of management measures on organic carbon, nitrogen and chemical structure of different soil fractions in *Phyllostachys edulis* plantations[J]. Chinese journal of applied ecology, 2020, 31(1): 25-34.
- [12] ARTZ R, CHAPMAN S J, ROBERTSON A, et al. FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands[J]. Soil biology & biochemistry, 2008, 40(2): 515-527.
- [13] 张福韬,乔云发,苗淑杰,等.长期玉米连作下黑土各组分有机质化学结构特征[J].中国农业科学,2016,49(10):1913-1924.
ZHANG F D, QIAO Y F, MIAO S J, et al. Chemical structure characteristics of all fractionations in mollisol organic matter under long-term continuous maize cropping[J]. Chinese agricultural science, 2016, 49(10): 1913-1924.
- [14] 李国栋,刘国群,庄舜尧,等.不同种植年限下雷竹林土壤的有机质转化[J].土壤通报,2010,41(4):845-849.
LI G D, LIU G Q, ZHUANG S Y, et al. Transformation of soil organic matter in *Phyllostachys praecox* forest under different planting durations[J]. Chinese journal of soil science, 2010, 41(4): 845-849.
- [15] 杨传宝.毛竹人工林土壤有机碳变化特征及稳定性机制[D].北京:中国林业科学研究院,2019.
YANG C B. Characteristics and stability mechanism of soil organic carbon in moso bamboo plantations[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2019.

- [16] 周萌, 肖扬, 刘晓冰. 土壤活性有机质组分的光谱分析方法及应用[J]. 土壤, 2020, 52(6): 1093-1104.
ZHOU M, XIAO Y, LIU X B. Methods and applications of spectral analysis for soil labile organic matter components[J]. Soils, 2020, 52(6): 1093-1104.
- [17] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. Nature, 2015, 528(7580): 60-68.
- [18] 王磊, 应蓉蓉, 石佳奇, 等. 土壤矿物对有机质的吸附与固定机制研究进展[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 805-818.
WANG L, YING R R, SHI J Q, et al. Progress on adsorption and fixed mechanism of soil minerals[J]. Acta pedologica Sinica, 2017, 54(4): 805-818.
- [19] MARGENOT A J, CALDERÓN FRANCISCO J, BOWLES T M, et al. Soil organic matter functional group composition in relation to organic carbon, nitrogen, and phosphorus fractions in organically managed tomato fields[J]. Soil science society of America journal, 2015, 79(3): 772-782.
- [20] 刘广路, 范少辉, 郭宝华, 等. 扩鞭繁殖毛竹林碳氮贮量的动态变化特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(3): 211-219.
LIU G L, FAN S H, GUO B H, et al. Dynamic changes in carbon and nitrogen storage of *Phyllostachys edulis* forest with rhizome expansion[J]. Journal of tropical and subtropical botany, 2013, 21(3): 211-219.
- [21] 宋佳, 黄晶, 高菊生, 等. 冬种绿肥和秸秆还田对双季稻区土壤团聚体和有机质官能团的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 564-570.
SONG J, HUANG J, GAO J S, et al. Effects of green manure planted in winter and straw returning on soil aggregates and organic matter functional groups in double cropping rice area[J]. Chinese journal of applied ecology, 2021, 32(2): 564-570.
- [22] DRAHORAD S L, JEHN F U, ELLERBROCK R H, et al. Soil organic matter content and its aliphatic character define the hydrophobicity of biocrusts in different successional stages[J]. Ecohydrology, 2020, 13(6): e2233.
- [23] 蓝贤瑾, 吕真真, 刘秀梅, 等. 长期施肥对红壤性水稻土颗粒有机质和矿物结合态有机质含量与化学组成的影响[J]. 土壤, 2021, 53(1): 140-147.
LAN X J, LYU Z Z, LIU X M, et al. Effects of long-term fertilization on contents and chemical compositions of particle and mineral-combined organic matter in red paddy soils[J]. Soils, 2021, 53(1): 140-147.
- [24] 张福韬, 乔云发, 苗淑杰, 等. 轮作对黑土团聚体有机质光谱特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 208-214.
ZHANG F T, QIAO Y F, MIAO S J, et al. Effect of crop rotation on spectral characteristics of organic matter in black soil aggregates[J]. Journal of soil and water conservation, 2015, 29(6): 208-214.
- [25] 常汉达, 王晶, 张凤华. 棉花长期连作结合秸秆还田对土壤颗粒有机碳及红外光谱特征的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1218-1226.
CHANG H D, WANG J, ZHANG F H. Effects of continuous cropping with straw return on particulate organic carbon and fourier transform infrared spectroscopy in cotton field[J]. Chinese journal of applied ecology, 2019, 30(4): 1218-1226.
- [26] 邵帅, 何红波, 张威, 等. 土壤有机质形成与来源研究进展[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 126-130.
SHAO S, HE H B, ZHANG W, et al. Research progress on the formation and source of soil organic matter[J]. Journal of Jilin normal university(natural science edition), 2017, 38(1): 126-130.
- [27] 常汉达, 王晶, 张凤华. 基于傅里叶红外光谱弃耕地开垦前后土壤有机质结构变化分析[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 333-340.
CHANG H D, WANG J, ZHANG F H. Change in soil organic matter structure before and after the reclamation for abandoned farmland based on fourier transform Infrared spectrometer[J]. Chinese journal of soil science, 2019, 50(2): 333-340.
- [28] 姜桂英, 张玉军, 魏喜, 等. 不同碳饱和水平下典型农田土壤有机质的红外光谱特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(16): 3117-3129.
JIANG G Y, ZHANG Y J, WEI X, et al. The soil infrared spectral characteristics of soil organic matter under different carbon saturation levels[J]. Scientia agricultura Sinica, 2018, 51(16): 3117-3129.
- [29] 张又弛, 李会丹. 生物炭对土壤中微生物群落结构及其生物地球化学功能的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 898-905.
ZHANG Y C, LI H D. Influence of biochar on the community structure and biogeochemical functions of microorganisms in soils[J]. Ecology and environmental sciences, 2015, 24(5): 898-905.
- [30] 李雯. 不同种植年限毛竹林土壤有机碳库组成及其化学结构的比较[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
LI W. The Comparison of physical composition and chemical structure of soil organic carbon pool among different-age moso bamboo plantations[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2021.
- [31] WANG T, TIAN Z, BENGTSON P, et al. Mineral surface-reactive metabolites secreted during fungal decomposition contribute to the formation of soil organic matter[J]. Environmental microbiology, 2017, 19: 5117-5129.