

引文格式: 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 等. 海南琼中不同林龄橡胶林土壤有机碳组分及其影响因素[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(5): 886–893. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202204033](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202204033)

海南琼中不同林龄橡胶林土壤有机碳 组分及其影响因素*

赵林林^{1,2,3}, 吴志祥^{1,3**}, 孙 瑞^{1,3}, 杨 川^{1,3}, 符庆茂^{1,3}, 唐梦琦⁴

(1. 中国热带农业科学院 橡胶研究所, 海南 海口 571101; 2. 南阳农业职业学院 农业工程学院, 河南 南阳 473000;
3. 农业农村部儋州热带作物科学观测实验站, 海南 儋州 571737; 4. 海南大学 林学院, 海南 海口 570228)

摘要:【目的】研究橡胶林土壤有机碳组分及理化性状间的关系, 为中国植胶区土壤质量和天然橡胶产业高效发展提供理论依据。【方法】以海南琼中大丰农场 5 种林龄 (2、9、12、27 和 31 龄) 橡胶林土壤样品为研究对象, 用农化分析方法测定土壤理化性质和有机碳组分含量。【结果】(1) 9 龄橡胶林土壤 pH 最高, 31 龄橡胶林土壤含水量最高且容重最低, 各林龄全氮、全磷和全钾含量分别低于、等于和高于全国水平。(2) 不同林龄橡胶林土壤有机碳各组分含量存在差异, 其中总有机碳含量为 4.58~8.52 g/kg, 易氧化有机碳含量为 1.72~4.66 g/kg, 稳定态有机碳含量为 2.05~3.27 g/kg, 水溶性有机碳含量为 0.23~0.48 g/kg。(3) 土壤总有机碳含量与易氧化有机碳含量、稳定态有机碳含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 相关系数分别为 0.321 和 0.333。【结论】27 和 31 龄橡胶林因林下积累有机物较多, 其土壤有机碳组分含量高于低林龄橡胶林; 2 龄橡胶林因刚定植, 林下植被裸露, 12 龄橡胶林因已开割, 因此, 有机物流失均较多。

关键词: 土壤总有机碳; 易氧化有机碳; 稳定态有机碳; 水溶性有机碳; 橡胶林

中图分类号: S714.5 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2023) 05-0886-08

Soil Organic Carbon Components and Influencing Factors of Rubber Plantations of Different Ages in Qiongzong, Hainan

ZHAO Linlin^{1,2,3}, WU Zhixiang^{1,3}, SUN Rui^{1,3}, YANG Chuan^{1,3}, FU Qingmao^{1,3}, TANG Mengqi⁴

(1. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China;
2. Agricultural Engineering College, Nanyang Vocational College of Agriculture, Nanyang 473000, China;
3. Danzhou Investigation & Experiment Station of Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou 571737, China; 4. College of Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: [Purpose] To study the relationship between organic carbon components and physicochemical properties of rubber forest soil, providing theoretical basis for soil quality and efficient development of natural rubber industry in China. [Method] Several soil physicochemical properties and soil organic carbon components were tested by agrochemical analysis method in five rubber plantation soil samples (2, 9, 12, 27 and 31 a) of Qiongzong Dafeng Farm in Hainan Province.

收稿日期: 2022-04-12

修回日期: 2023-09-25

网络首发日期: 2023-10-11

*基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目 (2019RC330, 2019RC335); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-34-ZP3)。

作者简介: 赵林林 (1995—), 女, 山东济南人, 硕士, 主要从事热带作物栽培生态研究。

E-mail: zhaollin955@163.com

**通信作者 Corresponding author: 吴志祥 (1970—), 男, 湖南湘阴人, 博士, 研究员, 主要从事热带作物栽培生态研究。E-mail: zhixiangwu@21cn.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20231010.1127.005>



[**Results**] 1) The soil pH in 9-age rubber plantations was the highest, the water content of 31-age rubber plantations was the highest and the bulk density was the lowest. The contents of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in each forest age were lower than, equal to and higher than the national level, respectively. 2) The contents of soil organic carbon in different aged rubber plantations were different. The content of total organic carbon changed from 4.58 to 8.52 g/kg, the content of easily oxidized organic carbon changed from 1.72 to 4.66 g/kg, and the content of stable organic carbon changed from 2.05 to 3.27 g/kg, the content of water-soluble organic carbon changed from 0.23 to 0.48 g/kg. 3) The content of total soil organic carbon was extremely positively correlated with the content of easily oxidized organic carbon and the content of stable organic carbon ($P<0.01$), with correlation coefficients of 0.321 and 0.333, respectively. [**Conclusion**] The soil organic carbon content of 27 and 31 aged rubber plantations is higher than that of low aged rubber plantations because of the accumulation of organic matter under the forest. Due to rigid planting, the vegetation under the 2-age rubber forest is exposed, and the 12-age rubber forest is cut, so the organic matter loss is more.

Keywords: soil total organic carbon; easily oxidized organic carbon; stable organic carbon; water soluble organic carbon; rubber plantations

土壤是植物繁衍后代、延续物种的主要载体,是影响植物生长发育的重要环境因子,也是生态系统的主要组成部分^[1]。土壤理化性质的变化直接影响土壤质地,对土壤蓄水保肥能力以及土壤养分的吸收和利用有重要影响^[2]。土壤有机碳组分是土壤肥力的衡量指标之一,也是植物生长所需碳元素的重要来源。土壤有机碳组分不仅影响着生态系统植被的更新与演替,还对生态系统的碳平衡起着关键作用,因此,森林土壤碳汇问题已成为近年来国内外关注的焦点内容^[3-4]。然而,土壤的形成、发育以及土壤养分的有效性也会受到植被群落组成、结构及多样性变化的影响^[5]。研究不同林龄植被群落的土壤有机碳组分及其相互关系,对植被更新、保护以及农作物增产提质具有重要的理论与实践意义。

橡胶树 [*Hevea brasiliensis* (Willd.ex A.Juss.) Muell.Arg.] 是一种原产于巴西亚马逊河流域马拉岳西部地区的大戟科 (Euphorbiaceae) 橡胶树属 (*Hevea*) 植物,分布于亚洲、非洲、大洋洲和拉丁美洲等 40 多个国家和地区^[6-8]。中国的橡胶种植面积及产量居世界第五,云南、海南和广东等地是其主要种植区,其中,海南是纬度最低且全部区域均为热带的地区,橡胶树种植面积占总植被面积的 1/4,在海南是非常重要的资源树种^[9-10]。截至目前,国内外针对橡胶林土壤的研究多集中于其理化性质和总有机碳层面^[11-13],对土壤有机

碳组分及其影响因素等的研究报道较少。本研究以海南琼中大丰农场不同林龄橡胶林土壤为对象,对其有机碳各组分的含量变异及其影响因素进行分析,以期为中国植胶区土壤质量和天然橡胶产业的高效发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于海南琼中大丰农场,地理位置为 N 19°13'48"~19°17'32", E 109°43'44"~109°46'36", 海拔 190.5 m。属于热带海洋季风气候,年均气温 22 ℃,年相对湿度 80%~85%,年降水量 2 200~2 444 mm,年均蒸发量 1 824.1 mm^[14-15]。琼中县的土壤主要由花岗岩以及少量紫色砂岩、砂页岩和安山岩风化而成。土壤类型多样,土深厚肥沃,按成土母质的不同,可分为南方山地灌丛草甸土、黄壤、赤红壤、砖红壤、红色石灰土、紫色土和水稻土 7 个土类 14 个亚类 37 个土属 103 个土种^[16-18]。采样地大丰农场位于琼中北部,生物和矿产资源较丰富,土壤类型多为砖红壤。不同林龄橡胶林样地的基本情况见表 1。

1.2 样品采集与方法

1.2.1 样品采集

2020 年 10 月,晴天时选取 5 种林龄 (2、9、12、27 和 31 龄) 橡胶林作为研究对象,各林龄严格按照“Z”字五点取样法采集土样 (避免肥穴

表 1 不同林龄橡胶林及对照样地土壤样品采集点的基本情况

Tab. 1 Basic situation of soil sample collection sites in rubber plantations of different ages and control plots

林龄/a age	经纬度 longitude and latitude	海拔/m altitude	坡向 slope	坡度/(°) gradient	树高/m tree height	胸径/cm diameter at breast height	郁闭度/% canopy density	覆盖率/% coverage
2	N19°16'38", E109°43'70"	160	南 south	50	3.39±0.85	19.75±5.92	15	40
9	N19°16'42", E109°43'44"	170	西 west	15	20.19±3.57	40.34±5.45	20	40
12	N19°17'32", E109°43'57"	180	东南 southeast	60	31.94±8.34	116.04±11.93	75	30
27	N19°16'60", E109°43'51"	180	西南 southwest	35	28.39±7.34	107.67±4.79	55	30
31	N19°16'43", E109°43'45"	170	西南 southwest	30	25.39±3.15	60.85±4.73	25	35

等), 每个采样点 (1 m×1 m) 垂直方向上分 3 层 (≥0~10、≥10~20 和 ≥20~40 cm) 采样, 每层在不同方向分别取 3 个重复, 最后混合为 1 袋, 保证每袋质量超过 500 g^[19], 共采集 75 袋样品。此外, 各层分别用铝盒和环刀采集等数量土样。

1.2.2 土壤理化性状及有机碳各组分的测定

土壤样品采集结束后, 去除石块及根系等杂物, 风干研磨后进行各指标分析。含水量采用烘干法测定, 容重采用环刀法测定^[20], 全氮含量采用凯氏定氮法测定^[21], 全磷含量采用钼锑抗比色法测定^[22], 全钾含量采用氢氧化钠熔融法测定^[23], 总有机碳含量采用重铬酸钾容量—外加热法测定^[24], 易氧化有机碳含量采用 333 mmol/L 高锰酸钾溶液比色法测定^[25], 稳定态有机碳含量采用 Na₂S₂O₈ 氧化法测定^[26], 水溶性有机碳含量采用 TOC 分析仪测定^[27]。

1.3 数据统计与分析

采用 Excel 2020 和 SPSS 22.0 处理数据和绘制图表; 采用单因素方差分析 (ANOVA) 检验不同林龄、不同土层各指标间的差异显著性 (Duncan 法), 采用双变量相关分析法分析土壤有机碳组分与理化性状之间的相关性 (Pearson 相关分析)。

2 结果与分析

2.1 不同林龄橡胶林土壤理化性状比较

由表 2 可知: 5 种林龄橡胶林样地的土壤 pH 值在 4.09~4.63 之间, 各林龄橡胶林土壤 pH 平均值排序为 9 龄>2 龄>27 龄>31 龄>12 龄, 其中 9 龄橡胶林的土壤 pH 值显著高于 12 和 31 龄, 2 和 27 龄、12 和 31 龄间的橡胶林土壤 pH 值差异不显著; 5 种林龄橡胶林样地的土壤含水量在 12.45%~21.02% 之间, 其中 31 龄橡胶林显著高于 2 和 9 龄, 12 和 27 龄橡胶林差异不显

著; 5 种林龄橡胶林样地的土壤容重在 1.39~1.57 g/cm³ 之间, 各林龄橡胶林间的土壤容重差异均不显著; 5 种林龄橡胶林样地的土壤全氮含量在 0.54~1.40 g/kg 之间, 其中 31 龄橡胶林显著高于 2、9、12 和 27 龄, 且这 4 个林龄间的全氮含量差异不显著; 5 种林龄橡胶林样地的土壤全磷含量在 0.35~0.99 g/kg 之间, 其中 27 龄橡胶林显著高于 2 和 12 龄, 且 2 和 12 龄、9 和 31 龄橡胶林间差异不显著; 5 种林龄橡胶林样地的土壤全钾含量在 2.75~27.13 g/kg 之间, 其中 9 龄橡胶林显著高于 2、12、27 和 31 龄, 且 12 和 31 龄橡胶林差异不显著。

2.2 不同林龄橡胶林土壤有机碳各组分的含量

2.2.1 土壤总有机碳含量

由图 1 可知: 5 种林龄橡胶林土壤总有机碳含量在 4.58~8.52 g/kg 之间。就平均值而言, 各林龄橡胶林土壤总有机碳含量排序为 27 龄>31 龄>9 龄>2 龄>12 龄; 就同一土层不同林龄而言, ≥20~40 cm 土层, 27 龄橡胶林土壤总有机碳含量显著高于 2 和 12 龄橡胶林, 而 ≥0~10 cm 和 ≥10~20 cm 层各林龄橡胶林土壤总有机碳含量差异不显著; 从同一林龄不同土层看, 各林龄橡胶林土壤总有机碳含量均随着土壤深度增加而整体呈下降趋势, 但下降趋势不显著。

2.2.2 易氧化有机碳含量

由图 2 可知: 5 种林龄橡胶林土壤易氧化有机碳含量在 1.72~4.66 g/kg 之间, 占土壤总有机碳含量的 20.19%~54.69%。各林龄橡胶林易氧化有机碳含量平均值表现为 31 龄>27 龄>2 龄>9 龄>12 龄; 从同一土层不同林龄看, 3 个土层的易氧化有机碳含量均表现为 31 龄橡胶林显著高于其余 4 个林龄橡胶林; 从同一林龄不同土层看, 2 龄橡胶林 ≥0~10 cm 层易氧化有机碳含量显著高于 ≥10~20 cm 和 ≥20~40 cm 层, 31 龄橡胶林 ≥

表 2 不同林龄橡胶林土壤的理化性状

Tab. 2 Physical and chemical properties of soil in rubber plantations of different forest ages

林龄/a forest age	土层/cm soil layer	pH值 pH value	含水量/% water content	容重/(g·cm ⁻³) bulk density	全氮含量/(g·kg ⁻¹) total nitrogen content	全磷含量/(g·kg ⁻¹) total phosphorus content	全钾含量/(g·kg ⁻¹) total potassium content
2	≥0~10	4.57±0.55	15.06±0.64	1.48±0.05	0.77±0.18	0.69±0.38	3.59±3.07
	≥10~20	4.37±0.41	14.74±2.00	1.53±0.10	0.76±0.53	0.42±0.27	3.19±2.86
	≥20~40	4.27±0.32	12.45±1.89	1.57±0.06	0.70±0.28	0.40±0.32	2.75±1.47
	平均值 average	4.40±0.12 ab	14.09±1.16 c	1.53±0.04 a	0.75±0.03 b	0.51±0.13 b	3.17±0.34 d
9	≥0~10	4.54±0.33	17.73±3.03	1.50±0.13	0.57±0.25	0.84±0.51	27.13±4.66
	≥10~20	4.63±0.51	16.76±3.47	1.53±0.20	0.57±0.12	0.54±0.50	26.79±3.36
	≥20~40	4.44±0.27	16.26±3.05	1.55±0.09	0.54±0.24	0.45±0.37	23.98±4.58
	平均值 average	4.54±0.08 a	16.92±0.61 b	1.53±0.02 a	0.63±0.10 b	0.61±0.17 ab	25.96±1.41 a
12	≥0~10	4.42±0.31	20.72±5.16	1.47±0.06	0.93±0.38	0.65±0.38	20.46±6.23
	≥10~20	4.16±0.17	18.27±4.57	1.49±0.09	0.57±0.20	0.42±0.38	16.96±7.07
	≥20~40	4.09±0.08	16.33±3.08	1.49±0.04	0.55±0.17	0.35±0.34	15.82±7.18
	平均值 average	4.22±0.14 b	18.44±1.80 ab	1.48±0.01 a	0.75±0.16 b	0.47±0.13 b	17.75±1.97 b
27	≥0~10	4.58±0.54	20.37±3.05	1.39±0.06	0.83±0.32	0.99±0.59	13.89±5.37
	≥10~20	4.22±0.14	18.81±1.60	1.53±0.06	0.77±0.17	0.84±0.68	11.58±7.07
	≥20~40	4.33±0.37	18.46±1.53	1.54±0.08	0.72±0.20	0.68±0.57	11.16±4.79
	平均值 average	4.38±0.15 ab	19.21±0.83 ab	1.49±0.07 a	0.70±0.05 b	0.84±0.12 a	12.21±1.20 c
31	≥0~10	4.30±0.38	21.02±4.49	1.40±0.16	1.40±0.47	0.78±0.46	19.64±3.67
	≥10~20	4.09±0.24	20.67±2.81	1.45±0.09	1.04±0.07	0.66±0.57	16.97±3.19
	≥20~40	4.26±0.21	19.13±2.95	1.46±0.02	0.95±0.23	0.46±0.41	15.01±4.96
	平均值 average	4.22±0.09 b	20.27±0.82 a	1.44±0.02 a	1.04±0.27 a	0.63±0.13 ab	17.20±1.90 b

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: In the same column, different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$).

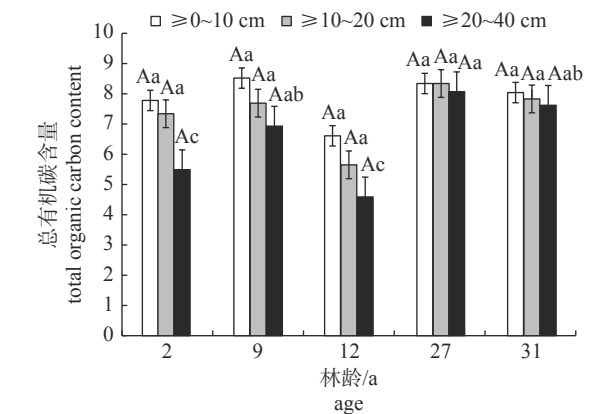


图 1 橡胶林土壤总有机碳含量

Fig. 1 Content of soil total organic carbon in rubber forest

注: 不同大写字母表示同林龄不同土层间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同土层不同林龄间差异显著 ($P<0.05$); 下同。

Note: Different uppercase letters indicate significant differences among different soil layers of the same age ($P<0.05$), different lowercase letters indicate significant differences among different forest ages in the same soil layer ($P<0.05$); the same as below.

0~10 cm 层易氧化有机碳含量显著高于≥20~40 cm 层, 2、9 和 27 龄橡胶林各层易氧化有机碳含量

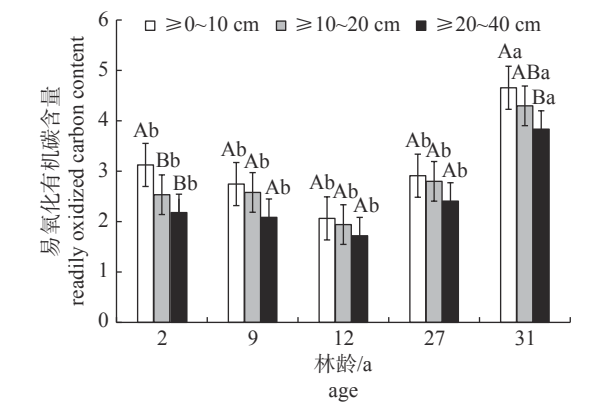


图 2 橡胶林土壤易氧化有机碳含量

Fig. 2 Content of soil readily oxidized carbon in rubber forest

差异均不显著, 但均表现出随着土壤深度增加而整体下降的趋势, 与土壤总有机碳表现规律一致。

2.2.3 稳定态有机碳含量

由图 3 可知: 5 种林龄橡胶林稳定态有机碳含量在 2.05~3.27 g/kg 之间, 占土壤总有机碳含量的 35.22%~38.38%。各林龄橡胶林稳定态有机

碳含量平均值表现为 31 龄>27 龄>2 龄>9 龄>12 龄；从同一土层不同林龄来看，各土层各林龄间的稳定态有机碳含量差异不显著；从同一林龄不同土层来看，各土层间稳定态有机碳含量随着土层深度增加呈下降趋势，其变化规律与土壤总有机碳和易氧化有机碳一致。

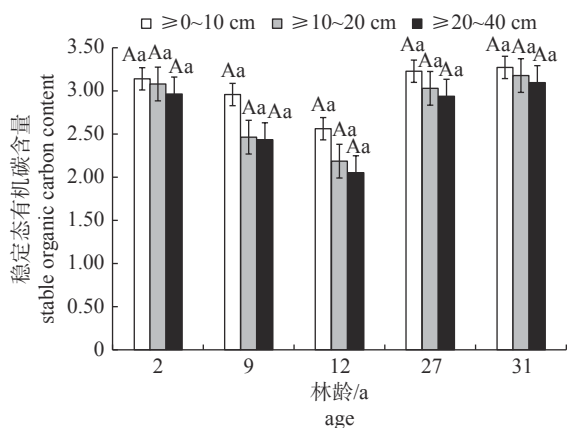


图 3 橡胶林土壤稳定态有机碳含量

Fig. 3 Content of soil stable organic carbon in rubber forest

2.2.4 水溶性有机碳含量

由图 4 可知：不同林龄橡胶林土壤水溶性有机碳含量在 0.23~0.48 g/kg 之间，占土壤总有机碳含量的 2.70%~5.63%。各林龄橡胶林稳定态有机碳含量平均值表现为 2 龄>31 龄>27 龄>12 龄>9 龄；从同一土层不同林龄来看，各土层不同林龄间水溶性有机碳含量差异均不显著；从同一林龄不同土层来看，各土层间水溶性有机碳含量随着土层深度增加呈下降趋势，其变化规律与土壤总有机碳、易氧化有机碳和稳定态有机碳一致。

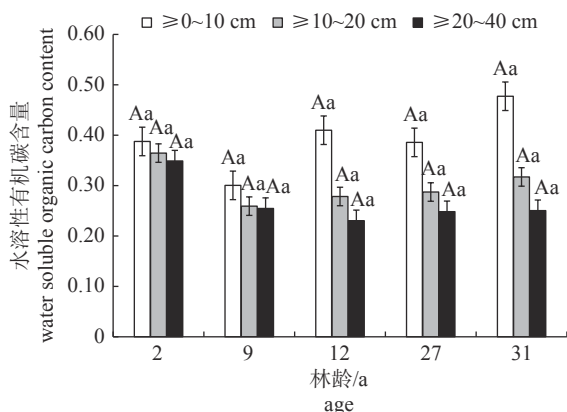


图 4 橡胶林土壤水溶性有机碳含量

Fig. 4 Content of soil water soluble organic carbon in rubber forest

2.3 土壤有机碳各组分及土壤理化性状间的相关性

由表 3 可知：土壤总有机碳含量与易氧化有机碳含量、稳定态有机碳含量呈极显著正相关，相关系数分别为 0.321 和 0.333，说明易氧化有机碳和稳定态有机碳均可反映土壤总有机碳的含量变化，且土壤总有机碳和稳定态有机碳的相关关系更为密切；易氧化有机碳含量与稳定态有机碳含量、含水量、全氮含量呈极显著正相关，与水溶性有机碳含量、全磷含量呈显著正相关，与容重呈极显著负相关；稳定态有机碳含量与全氮含量呈极显著正相关，与其他指标的相关性不大；水溶性有机碳与 pH 值、全氮含量、全磷含量呈极显著正相关，与其他指标的相关性不显著。可见，土壤有机碳组分与理化性状各指标间相互作用、相互影响，但各养分指标间的影响程度存在差异。

3 讨论

3.1 橡胶林土壤理化性状

土壤 pH 值是作物种植时最重要的指标之一，不同作物生长时有适宜的 pH 值范围，pH 值过低或过高都会影响养分吸收，造成肥料浪费^[28]。过酸易引起土壤板结并造成微量元素中毒，还会破坏土壤微生物的生存环境，造成有益菌减少，加速土壤有机碳及其他养分的流失，使土壤失去耕种价值^[29]。本研究中，2 和 9 龄未开割橡胶林 pH 值高于 12、27 和 31 龄等开割林，一方面，说明割胶改变了橡胶树的部分生理生化代谢途径，如根系对土壤中矿质元素的吸收量及比率发生了改变，造成橡胶林土壤酸化；另一方面，橡胶林经营过程中一系列管理措施（如施肥、除草、喷洒农药等）以及橡胶树的生理特性改变了土壤的部分化学特征，造成土壤酸化^[30]。含水量是橡胶林生态系统中重要的生态因子，在橡胶树新陈代谢活动过程中发挥着重要的作用^[31]。林希昊等^[32]认为：橡胶林土壤含水量会影响橡胶树细根生物量，橡胶林下植被类型也会影响土壤水分状况。本研究中，31 龄橡胶林的土壤含水量最高，分析其原因是 31 龄橡胶林已弃割，林下植被覆盖率高，对土壤水分的涵养能力较强。容重是重要的土壤物理性状，是衡量土壤环境好坏的

表 3 各指标间的相关性分析
Tab. 3 Correlation analysis among different indexes

指标 index	总有机碳 total organic carbon	易氧化有机碳 readily oxidized carbon	稳定态有机碳 stable organic carbon	水溶性有机碳 water soluble organic carbon	pH值 pH value	容重 bulk density	含水量 water content	全氮 total nitrogen	全磷 total phosphorus
易氧化有机碳 readily oxidized carbon	0.321**								
稳定态有机碳 stable organic carbon	0.333**	0.351**							
水溶性有机碳 water soluble organic carbon	-0.106	0.228*	0.173						
pH值 pH value	0.006	-0.009	0.061	0.334**					
容重 bulk density	-0.213	-0.306**	-0.095	-0.183	0.058				
含水量 water content	0.040	0.406**	-0.058	0.113	-0.200	-0.315**			
全氮 total nitrogen	0.101	0.596**	0.303**	0.704**	0.053	-0.379**	0.384**		
全磷 total phosphorus	0.062	0.249*	0.182	0.355**	0.299**	-0.099	0.131	0.176	
全钾 total potassium	0.099	0.012	-0.119	-0.215	0.064	-0.126	0.284*	-0.010	0.054

注: “*”表示显著相关 ($P<0.05$), “**”表示极显著相关 ($P<0.01$)。
Note: “*” indicates significant correlation ($P<0.05$), “**” indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

重要指标之一,它直接影响着土壤水肥供应、通气状况及作物根系穿透阻力等因素^[33]。本研究中,31 龄橡胶林土壤容重最小,说明弃割的橡胶林因林下植被生态系统的涵养作用,使得土壤结构和透气性能变好。氮、磷、钾是植物需要量和收获时带走量较多的 3 种营养元素,而它们通过残茬和根的形式归还给土壤的量却不多,因此往往需要以施用肥料的方式补充养分^[34]。本研究中,各林龄橡胶林土壤的全氮含量均低于中国土壤平均全氮含量 (1.54 g/kg),全磷含量处于中国土壤全磷含量 (0.2~1.1 g/kg) 的中等水平,全钾含量处于中国土壤全钾含量 (0.5~25.0 g/kg) 的较高水平,说明琼中植胶区土壤全氮含量偏低,全磷和全钾含量相对较高。因此,植胶和割胶过程中应注意合理施肥,加强管理,控制土壤营养元素含量处于适宜橡胶树生长的范围。

3.2 橡胶林土壤有机碳各组分含量特征

赵林林等^[35]研究表明:各林龄橡胶林土壤有机碳含量由高到低为 10~15 龄>0~5 龄>16~20 龄>31~35 龄>26~30 龄。李涛等^[36]认为:14 龄开割林土壤有机碳含量低于 7 龄未开割林。本研究中,各林龄橡胶林土壤有机碳含量由高到低为 27 龄>

31 龄>9 龄>2 龄>12 龄,这是因为 27 和 31 龄橡胶林凋落物积累了较多土壤有机碳,尤其是 31 龄橡胶林,林下植被种类多,覆盖率高,利于土壤转换有机碳;而 2 龄橡胶林刚定植,林下植被裸露,由于是初代胶林,也无上一代胶林枯枝落叶的补给,故土壤有机碳含量较低;12 龄橡胶林因开割多年,随着乳胶流出,土壤中的有机物逐渐流失,再加上补给不及时,土壤有机碳含量最低;9 龄橡胶林刚开割,土壤养分流失不严重,土壤有机碳处于各林龄的中间水平。易氧化有机碳和水溶性有机碳是土壤的主要活性组分,其含量高低可预测土壤碳库活跃度^[37]。其中,易氧化有机碳具有一定的溶解性,是易氧化、易被土壤微生物矿化分解的活性有机碳^[38]。本研究中,31 龄橡胶林下土壤微生物数量较多,分解的有机碳较多,故其易氧化有机碳最高。稳定态有机碳是有机碳中较难降解的复杂化学结构物质,对土壤有机碳的稳定性具有重要作用^[39]。本研究中,27 龄橡胶林稳定态有机碳含量偏高,该林龄橡胶林因年代久远,其进入土壤的有机物除物理破碎和淋洗过程外,在微生物和酶的选择作用下,碳水化合物和蛋白类物质最先分解,有机物

的颗粒减小, 碳氮比下降, 导致较难降解的复杂化学结构物质富集, 积累了较多稳定态有机碳。本研究中, 各林龄橡胶林的土壤有机碳及组分含量均随着土层深度增加而减少, 这是因为土壤表层凋落物较多, 微生物的分解作用最强; 深层土壤因植物根系减少, 其有机碳及组分含量降低。

3.3 橡胶林土壤总有机碳以及各组分影响因素分析

土壤总有机碳受气候、土壤、植被等自然环境和人为活动的综合影响^[40]。本研究中, 土壤总有机碳含量与易氧化有机碳含量、稳定态有机碳含量呈极显著正相关, 说明易氧化有机碳和稳定态有机碳含量均可以作为衡量土壤总有机碳含量的指标。易氧化有机碳含量与稳定态有机碳含量、水溶性有机碳含量、含水量、全氮含量、全磷含量呈显著或极显著正相关, 说明水分和氮磷含量高, 土壤微生物分解作用增强, 其活性有机碳含量高, 这可能与氮、磷主要以有机态形式存在于土壤中有关^[41]。易氧化有机碳含量与土壤容重呈极显著负相关, 说明板结率低的土壤易氧化有机碳含量高。稳定态有机碳含量与全氮含量呈极显著正相关, 水溶性有机碳含量与全氮含量、全磷含量呈极显著正相关, 说明土壤有机碳组分与营养元素间相互作用、相互影响, 尤其和氮磷含量相关性更大。魏培洁等^[42]认为: 土壤水溶性有机碳和总有机碳的比值与 pH 值呈显著正相关, 土壤 pH 值和温度是影响两者比值的主控因子。本研究中, 水溶性有机碳含量与 pH 值呈极显著正相关, 说明在一定范围内, pH 值较高有利于水溶性有机碳的积累。橡胶林中, 土壤总有机碳组分不仅受气候和土壤属性的影响, 也受施肥和割胶等管理措施的强烈影响。此外, 橡胶树自身、植被郁闭度和林下覆盖率等环境因子也在一定程度上影响土壤总有机碳的含量。橡胶林生态系统中, 高温高湿以及水土流失等环境易造成土壤养分流失, 并引起养分利用率下降, 进而导致土壤肥力下降, 这些因素在今后的相关研究中需重点关注。

4 结论

海南琼中橡胶林土壤有机碳组分含量存在差异, 不同林龄橡胶林土壤有机碳各组分间相关性

较强, 且土壤 pH、容重、含水量以及氮、磷、钾含量均是影响土壤有机碳各组分含量的重要因子, 各项指标间存在密切的相互制约、相互促进关系。

[参考文献]

- [1] ZABALOY M C. One health: soil health and its link with human health[J]. Revista Argentina de Microbiología, 2021, 53(4): 275. DOI: [10.1016/J.RAM.2021.11.001](https://doi.org/10.1016/J.RAM.2021.11.001).
- [2] 宋艳红, 史正涛, 王连晓, 等. 纳板河流域不同植被类型下土壤肥力综合评价[J]. 上海农业学报, 2018, 34(4): 29. DOI: [10.15955/j.issn1000-3924.2018.04.07](https://doi.org/10.15955/j.issn1000-3924.2018.04.07).
- [3] 魏强, 凌雷, 张广忠, 等. 甘肃兴隆山主要森林类型土壤渗透性[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(3): 57. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2013.03.009](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2013.03.009).
- [4] 王卫霞, 杨光, 阿丽娅·阿力木, 等. 3种不同农作方式对土壤轻组有机碳的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(11): 2477. DOI: [10.16213/j.cnki.scjas.2020.11.010](https://doi.org/10.16213/j.cnki.scjas.2020.11.010).
- [5] 鲁伟丹, 李俊华, 罗彤, 等. 连续三年不同有机肥替代率对小麦产量及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1330. DOI: [10.11674/zwylf.2021073](https://doi.org/10.11674/zwylf.2021073).
- [6] WU C T, LAN L, LI Y, et al. The relationship between latex metabolism gene expression with rubber yield and related traits in *Hevea brasiliensis*[J]. BMC Genomics, 2018, 19(1): 897. DOI: [10.1186/s12864-018-5242-4](https://doi.org/10.1186/s12864-018-5242-4).
- [7] SINGH D, SLIK J W F, JEON Y S, et al. Tropical forest conversion to rubber plantation affects soil micro- & mesofaunal community & diversity[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 5893. DOI: [10.1038/s41598-019-42333-4](https://doi.org/10.1038/s41598-019-42333-4).
- [8] 刘少军, 周广胜, 房世波. 中国橡胶树种植气候适宜性区划[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2335. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2015.12.006](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2015.12.006).
- [9] LOPEZ S, ROUSSET F, SHAW F H, et al. Joint effects of inbreeding and local adaptation on the evolution of genetic load after fragmentation[J]. Conservation Biology, 2009, 23(6): 1618. DOI: [10.1111/j.1523-1739.2009.01326.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01326.x).
- [10] LI Y W, XIA Y J, LEI Y B, et al. Estimating changes in soil organic carbon storage due to land use changes using a modified calculation method[J]. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2014, 8(1): 45. DOI: [10.3832/for1151-007](https://doi.org/10.3832/for1151-007).
- [11] 原慧芳, 黄菁, 田耀华. 不同管理方式下山地胶园土壤物理和水分特性[J]. 热带作物学报, 2020, 41(5): 1057. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2561.2020.05.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2020.05.028).
- [12] DAUPHIN C, SUVANNANGU N, HAMMECKER C, et al. Unexpected absence of control of rubber tree growth by soil water shortage in dry subhumid climate[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33(3): 531. DOI: [10.1007/s13593-012-0129-2](https://doi.org/10.1007/s13593-012-0129-2).
- [13] LANGENBERGER G, CADISCH G, MARTIN K, et al. Rubber intercropping: a viable concept for the 21st century[J]. Agroforestry Systems, 2017, 91(3): 577. DOI: [10.1007/s10643-016-0600-0](https://doi.org/10.1007/s10643-016-0600-0).

- 1007/s10457-016-9961-8.
- [14] 陈丽艳,王城城,赵从举,等.海南西部桉树林地土壤水分多时间尺度变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(1):163. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2020.022.
- [15] 陈帮乾,云挺,安锋,等.基于Landsat和Sentinel-2时间序列影像的海南西部橡胶林龙卷风灾情评估[J].遥感学报,2021,25(3):816. DOI: 10.11834/jrs.20210184.
- [16] 高健翁,龚晶晶,杨剑洲,等.海南岛琼中黎母山—湾岭地区土壤重金属元素分布特征及生态风险评估[J].地质通报,2021,40(5):807.
- [17] 潘孝忠,谭丽霞,卓免福,等.海南琼中热带农田土壤养分分布特征研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2016,31(6):1149. DOI: 10.16211/j.issn.1004-390X(n).2016.06.028.
- [18] 覃怀德,吴炳孙,吴敏,等.海南省琼中县橡胶园土壤磷素空间变异特征及磷肥分区管理分析[J].热带作物学报,2014,35(2):369. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2014.02.027.
- [19] 陈心桐,徐天乐,李雪静,等.中国北方自然生态系统土壤有机碳含量及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(4):1133. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201904.004.
- [20] 王纪杰,王炳南,李宝福,等.不同林龄巨尾桉人工林土壤养分变化[J].森林与环境学报,2016,36(1):8. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2016.01.002.
- [21] 宋小云.凯氏法测定土壤全氮的方法改进[J].环境与发展,2019,31(8):120. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2019.08.068.
- [22] 李朝英,郑路.流动分析仪快速测定土壤全磷含量[J].中国土壤与肥料,2020(4):266. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.19310.
- [23] 吴秀玲,陈惠娟,孙媛.氢氧化钠熔融法测定土壤中全磷、全钾及氟化物实验[J].宁夏农林科技,2017,58(7):44. DOI: 10.3969/j.issn.1002-204X.2017.07.020.
- [24] 白青鸿,江映,梁琪,等.土壤有机质检测方法的改进及过程优化[J].广东化工,2019,46(5):91. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2019.05.040.
- [25] TATZBER M, SCHLATTER N, BAUMGARTEN A, et al. KMnO₄ determination of active carbon for laboratory routines: three long-term field experiments in Austria[J]. Soil Research, 2015, 53(2): 190. DOI: 10.1071/SR14200.
- [26] EKRCKM K. Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(12): 1591. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2003.08.007.
- [27] 张爱萍.总有机碳分析仪测定重点水质监控断面的TOC[J].广东化工,2019,46(10):42. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2019.10.018.
- [28] 许木果,丁华平,刘忠妹,等.橡胶园酸性、中性土壤交换性钙、镁测定方法研究[J].中国农学通报,2020,36(18):73.
- [29] BATTAGLIA J M A, WEBER R J, NENES A, et al. Effects of water-soluble organic carbon on aerosol pH[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(23): 14607. DOI: 10.5194/acp-19-14607-2019.
- [30] 邹鑫,陈春峰,刘文杰.西双版纳橡胶种植对土壤团聚体及理化性质的影响[J].土壤通报,2020,51(3):597. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020.03.13.
- [31] 耿思文,吴志祥,杨川.海南儋州橡胶林土壤水分变化及其对气象因子的响应特征[J].热带农业科学,2019,39(11):11. DOI: 10.12008/j.issn.1009-2196.2019.11.002.
- [32] 林希昊,陈秋波,华元刚,等.不同树龄橡胶林土壤水分和细根生物量[J].应用生态学报,2011,22(2):331. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2011.0076.
- [33] 朱凯,刘文杰,刘佳庆.西双版纳地区胶农复合系统的土壤斥水特性[J].云南大学学报(自然科学版),2017,39(1):137. DOI: 10.7540/j.ynu.20160477.
- [34] 高玉尧,许文天,刘实忠.氮磷钾不同施肥水平对橡胶草生长发育的影响[J].热带作物学报,2017,38(2):199. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2017.02.003.
- [35] 赵林林,吴志祥,孙瑞,等.云南不同林龄橡胶林土壤有机碳含量变化及影响因子[J].云南农业大学学报(自然科学),2021,36(3):532. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202010032.
- [36] 李涛,李芹,陈林杨,等.不同龄级橡胶林土壤肥力变化差异研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2017,32(2):303. DOI: 10.16211/j.issn.1004-390X(n).2017.02.016.
- [37] 张俊华,丁维新,孟磊.海南热带橡胶园土壤易氧化有机碳空间变异特征研究[J].生态环境学报,2010,19(11):2563. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2010.11.041.
- [38] 徐侠,王丰,栾以玲,等.武夷山不同海拔植被土壤易氧化有机碳[J].生态学杂志,2008,27(7):1115. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2008.0230.
- [39] SELVALAKSHMI S, KALARIKKAL R K, YANG X. Predicting the habitat distribution of rubber plantations with topography, soil, land use, and climatic factors[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(9): 48. DOI: 10.1007/s10661-020-08563-0.
- [40] SHERON Y L, KATHERINE T, MEAGAN E, et al. Soil organic carbon development and turnover in natural and disturbed salt marsh environments[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(2): e2020GL090287. DOI: 10.1029/2020GL090287.
- [41] 马建刚,宋维峰,毛頔,等.云南哈尼梯田系统土壤碳氮的时空分布特征[J].四川农业大学学报,2021,39(1):1. DOI: 10.16036/j.issn.1000-2650.2021.01.011.
- [42] 魏培洁,刘放,吴明辉,等.疏勒河源多年冻土区土壤水溶性有机碳变化特征[J].草业科学,2021,38(4):605. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0401.

责任编辑:何承刚