

桂南茶园土壤团聚体有机碳和养分对植茶年限的响应

王晟强¹ 杜 磊² 叶绍明^{1*}

(¹广西大学林学院, 南宁 530004; ²四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘 要 研究茶园土壤团聚体有机碳和养分对植茶年限的响应机制, 可为茶园提升土壤肥力、保障土壤健康及促进土壤资源可持续利用奠定理论基础。本研究以植茶年限 8、17、25 和 43 年的桂南南山白毛茶园土壤为对象, 采集 0~20 cm 土层原状土样, 通过干筛法获得各粒径 (>2、2~1、1~0.25 和 <0.25 mm) 团聚体, 并测定其中有机碳和养分含量。结果表明: 不同植茶年限土壤团聚体组成以 >2 mm 粒径团聚体为主, 其含量显著高于其他粒径团聚体, 平均值为 63.8%; 其次是 <0.25 mm 粒径团聚体; 而 2~1 和 1~0.25 mm 粒径团聚体含量较低, 平均值分别为 9.9% 和 7.8%。土壤团聚体稳定性指标平均重量直径 (MWD) 表现为植茶 17 年 > 8 年 > 25 年 > 43 年。各植茶年限土壤团聚体有机碳、全氮含量随着粒径的增大而升高, 其中 >2 和 2~1 mm 粒径团聚体较高, 平均值在 >2 mm 粒径中分别为 18.76 和 0.84 g · kg⁻¹、在 2~1 mm 粒径中分别为 18.65 和 0.80 g · kg⁻¹; 不同植茶年限土壤团聚体碱解氮、有效磷和速效钾含量在 <0.25 mm 粒径团聚体中最高, 平均值分别为 50.43、23.06 和 68.04 mg · kg⁻¹。长期植茶有助于土壤有机碳、全氮、碱解氮和有效磷的积累, 但其储量的积累速率却逐年降低, 不利于土壤速效钾的保持, 其储量的流失速率在植茶中期 (17~25 年) 最高。在区域茶园管理中, 应重视植茶 17 年以后土壤团聚体稳定性降低、速效钾流失加剧等问题, 以保障茶园土壤质量及促进土壤资源可持续利用。

关键词 植茶年限; 土壤团聚体; 有机碳; 养分

Responses of soil aggregate-associated organic carbon and nutrients to tea cultivation age in southern Guangxi, China. WANG Sheng-qiang¹, DU Lei², YE Shao-ming^{1*} (¹College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; ²College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China).

Abstract: Understanding the response mechanism of soil aggregate-associated organic carbon (OC) and nutrients to tea cultivation age can lay a theoretical foundation for improving soil fertility, ensuring soil health, and promoting sustainable utilization of soil resources in the tea plantations. In this study, concentrations of soil OC and nutrient were analyzed in >2, 2–1, 1–0.25, and <0.25 mm fractions (split by a dry-sieving procedure) at the 0–20 cm soil layer in four tea plantations with Baimao tea of different ages (8, 17, 25, and 43 a) in southern Guangxi, China. The distribution of soil aggregates showed that the dominant aggregates were >2 mm fractions with a mean value of 63.8%, followed by <0.25 mm fractions, while 2–1 and 1–0.25 mm fractions with mean values of 9.9% and 7.8%, respectively. As an indicator of soil aggregate stability, the mean weight diameter (MWD) in the tea plantations showed an order of 17 a > 8 a > 25 a > 43 a. Regardless of tea cultivation age, soil aggregate-associated OC and total nitrogen (TN) concentrations increased with increasing aggregate size. Soil OC and TN concentrations in >2 and 2–1 mm fractions were significantly higher than those in other fractions. The mean values of soil OC and TN concentrations were 18.76 and 0.84 g · kg⁻¹ in the >2 mm fractions, and were 18.65 and 0.80 g · kg⁻¹ in the 2–1 mm fraction. Soil aggregate-associated available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) concentrations were highest in the <0.25 mm fractions with mean values of

本文由国家自然科学基金项目 (31460196) 和广西自然科学基金项目 (2019GXNSFBA185012) 资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31460196) and Natural Science Foundation of Guangxi (2019GXNSFBA185012).

2019-07-04 Received, 2020-01-15 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yshaoming@163.com

50.43, 23.06, and 68.04 mg · kg⁻¹, respectively. Long-term tea cultivation was favorable to the accumulation of soil OC, TN, AN, and AP, whereas the accumulation rates of these element stocks in the whole soil decreased with increasing tea cultivation age. In contrast, soil AK was susceptible to leaching in tea cultivation, with the loss rate of this element stock in the middle stage (from 17 to 25 a) being higher than those in the other stages. To ensure soil quality and promote the sustainable utilization of soil resources, more attention should be paid to the problems such as the decrease of soil aggregate stability and the aggravation of AK loss after 17 a of tea cultivation.

Key words: tea cultivation age; soil aggregate; organic carbon; nutrient.

广西地处我国南疆,雨水充沛,具有优越的植茶气候条件和悠久的制茶饮茶历史,是我国重要的茶叶产区之一。截至 2017 年底,广西茶园面积已达 7.3 万 hm²,茶叶产量 7.0 万 t,毛茶产值超过 45 亿元^[1]。其中,80%以上的茶园分布在贫困县,茶产业已成为多数贫困县脱贫致富的支柱产业,在农民增收脱贫方面发挥着十分关键的作用^[2]。然而,在茶园生态系统中,不合理的施肥管理、茶树凋落物归还及根系分泌物释放等原因,使土壤肥力在植茶过程中发生一系列变化,从而影响茶树的生长发育及茶叶的产量和品质^[3-7]。目前,关于茶园土壤质量与健康演变的研究集中在江南茶区和西南茶区,而在华南茶区尤其是广西茶园却鲜见报道,广西茶园土壤肥力在植茶过程中如何变化尚不清楚。

作为土壤结构的基本单元,团聚体是形成良好土壤结构的物质基础,影响着土壤质量和土壤健康的动态变化,分析土壤团聚体组成及其稳定性特征可以间接量化土壤可蚀性,是研究土壤侵蚀和水土保持的重要内容^[8-9]。不同粒径团聚体不仅决定着土壤孔隙分布、数量搭配、形态特征及土壤对外界应力的敏感性,而且在土壤有机碳和养分保持、供应及转化等方面发挥着不同的作用^[10-12]。了解土壤有机碳和养分在团聚体中的分布状况,对调控和提升土壤肥力水平具有重要意义。茶园土壤有机碳和养分对植茶年限的响应十分敏感,但多数研究并未揭示土壤有机碳和养分在团聚体中的变化情况^[3-4,13]。鉴于此,本研究以我国四大茶市之一的“西南茶城”——南宁市横县为研究区域,从土壤团聚体角度揭示土壤有机碳和养分对植茶年限的响应机制,以期广西茶园提升土壤肥力、保障土壤健康及促进土壤资源可持续利用提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于 22°08′—23°30′ N 和 108°48′—109°37′ E,属亚热带季风气候区,年均温 21.6 ℃,极

端最高气温 40.4 ℃,极端最低气温-2.4 ℃,年均降雨量约 1304 mm,全年 79.1%的降雨量发生在 4—9 月。地貌以丘陵台地为主,土壤类型为赤红壤。该区域植茶历史悠久,以国家地理标志保护产品南山白毛茶为主,从而形成了具有一定规模的不同种植年限的南山白毛茶园。供试茶园位于横县那阳镇,茶树种植密度约 6×10⁴株 · hm⁻²,其中大行距 (160±20) cm,小行距 (30±10) cm,株距 (25±5) cm。每年 11 月中旬,基肥施猪圈肥 12000 kg · hm⁻²、复合肥 650 kg · hm⁻²,沿树冠边缘垂直下方开沟,依次施入复合肥、猪圈肥,最后覆土。次年追肥 3 次,追肥位置与基肥相同。春茶追肥于 3 月中旬施尿素 500 kg · hm⁻²、复合肥 1200 kg · hm⁻²;夏茶和秋茶追肥分别于 6 月下旬和 9 月上旬施尿素 300 kg · hm⁻²、复合肥 650 kg · hm⁻²。修剪方式以轻修剪为主,每年修剪一次,在秋茶采摘后剪去树冠面上的突出枝条和树冠表层 3~10 cm 枝叶,然后归还土壤。在植茶过程中没有使用除草剂,并用黄色防虫纸板代替化学农药预防害虫。

1.2 样品采集与处理

在野外调查的基础上,根据不同植茶年限茶园的地质条件和施肥情况等进行综合考虑,选择成土母质相同、坡向坡度相似、管理措施一致的植茶年限分别为 8、17、25 和 43 年的南山白毛茶园土壤为研究对象(表 1)。首先,在每个植茶年限茶园中布设

表 1 不同植茶年限茶园的基本信息
Table 1 Basic information of the tea plantations with different ages

植茶年限 Tea cultivation age (a)	地理坐标 Geographical coordinates	海拔 Elevation (m)	坡度 Slope gradient (°)	面积 Area (hm ²)
8	22°48′33″ N, 109°12′09″ E	558	14	16.17
17	22°48′12″ N, 109°12′51″ E	561	13	15.39
25	22°48′54″ N, 109°12′36″ E	563	15	12.46
43	22°48′25″ N, 109°12′24″ E	557	13	13.23

表 2 不同植茶年限茶园凋落物及土壤理化性质
Table 2 Litter and soil physicochemical properties in the four tea plantations with different ages (mean±SD)

植茶年限 Tea cultivation age (a)	凋落物 Litter		土壤 Soil									
	重量 Weight (g·m ⁻²)	碳氮比 C/N ratio	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	砂粒 Sand (2~0.02 mm, %)	粉粒 Silt (0.02~0.002 mm, %)	黏粒 Clay (<0.002 mm, %)	pH	有机碳 Organic C (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
8	821±	14.23±	1.29±	30.2±	36.2±	33.6±	4.57±	14.37±	0.67±	40.24±	17.48±	78.49±
	21b	1.61c	0.03a	0.1a	0.3a	0.2a	0.03a	0.41c	0.02d	2.25c	1.24c	3.17a
17	974±	12.68±	1.27±	31.2±	36.3±	32.4±	4.51±	16.96±	0.77±	43.72±	19.54±	70.56±
	34a	1.26c	0.04a	0.2a	0.2a	0.2a	0.02a	0.52b	0.01c	2.41b	1.38b	2.06b
25	786±	17.32±	1.30±	30.8±	35.9±	33.3±	4.32±	17.58±	0.81±	45.19±	20.44±	52.46±
	28c	2.24b	0.03a	0.2a	0.2a	0.2a	0.01b	0.41ab	0.03b	1.83ab	1.01b	2.34c
43	648±	21.37±	1.31±	29.3±	37.5±	33.2±	4.17±	18.75±	0.85±	48.56±	22.37±	45.38±
	19d	3.11a	0.02a	0.2a	0.1a	0.1a	0.02c	0.48a	0.02a	1.49a	0.98a	1.47d

同行不同小写字母表示不同植茶年限间差异显著($P<0.05$) Different lowercase letters in the same row meant significant difference among different tea cultivation ages at 0.05 level.

5 个典型样方(30 m×30 m),样方间距约 800 m;然后,在每个样方内按“S”形设置 5 个采样点,具体采样位置设在树冠边缘垂直下方;最后,在每个采样点的土壤表面收集 1 m²(1 m×1 m)的凋落物样品,在 0~20 cm 土层采集原状土样并测定其容重。

将每个样方内的凋落物样品和土壤样品分别混合均匀,共得到 20 个混合凋落物样品和 20 个混合土壤样品。将每个混合凋落物样品置于 80 ℃烘箱内烘至恒重,并称量,随后测定相关指标。将每个混合土壤样品沿自然结构轻轻掰开并过 5 mm 筛,除去动植物残体和小石块等,在室内风干后将其分为两部分:一部分用于测定土壤理化性质,另一部分采用干筛法^[14]将其分为>2、2~1、1~0.25 和<0.25 mm 粒径团聚体,用于测定土壤团聚体性质。

1.3 测定项目与方法

凋落物全碳测定采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法,全氮采用靛蓝比色法。土壤容重采用环刀法,颗粒组成采用比重计法,pH 值采用电位法,有机碳采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法,全氮采用凯氏法,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用碳酸氢钠浸提-紫外分光光度计比色法,速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度计法^[15]。不同植茶年限茶树凋落物和土壤的基本理化性质见表 2。

1.4 数据处理

土壤团聚体平均重量直径(mean weight diameter, MWD, mm)的计算采用 Oztas 等^[16]的公式:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{d}_i w_i) / \sum_{i=1}^n W_i$$

式中: \bar{d}_i 为第*i*粒径团聚体直径的平均值(mm); W_i 为第*i*粒径团聚体的质量百分含量(%)。

土壤有机碳储量(OCS, g·m⁻²)的计算采用 Eynard 等^[17]的公式:

$$OCS = \sum_{i=1}^n (W_i \times OC_i) \times B_d \times H \times 10$$

式中:OC_{*i*}为第*i*粒径团聚体的有机碳含量(g·kg⁻¹); B_d 为土壤容重(g·cm⁻³); H 为土层厚度(cm)。土壤养分储量的计算方法与有机碳类似。

数据统计分析在 DPS 11.0 软件中进行,采用最小显著差异法进行不同处理的差异显著性检验($\alpha=0.05$),采用 Microsoft Excel 2007 制作图表。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成及稳定性特征

不同植茶年限土壤团聚体组成以>2 mm 粒径团聚体为主,其含量显著高于其他粒径团聚体,平均值为 63.8%;其次是<0.25 mm 粒径团聚体,平均值为 18.6%;而 2~1 和 1~0.25 mm 粒径团聚体含量较低,平均值分别为 9.9%和 7.8%(表 3)。随着植茶年限的延长,各粒径团聚体含量的变化趋势有所不同,>2 mm 粒径团聚体含量先升高后降低,在植茶 17 年时显著高于其他年限,<0.25 mm 粒径团聚体含量则呈相反的变化趋势,而 2~1 和 1~0.25 mm 粒径团聚体含量在植茶过程中变化不明显。土壤团聚体 MWD 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标,其值越大,团聚体稳定性越强。在本研究中,茶园土壤团聚体 MWD 值表现为植茶 17 年>8 年>25 年>43 年,其中植茶 17 年土壤团聚体 MWD 值显著大于其他年限,说明植茶 17 年茶园有较稳定的土壤团聚体结构(表 3)。

2.2 土壤团聚体有机碳和养分含量变化

各植茶年限土壤团聚体有机碳含量随着粒径的减小而降低,其中>2 和 2~1 mm 粒径团聚体有机碳含量较高,且两者间差异不显著,平均值分别为

表 3 植茶年限对土壤团聚体分布及稳定性的影响
Table 3 Effects of tea cultivation age on distribution and stability of soil aggregates

植茶年限 Tea cultivation age (a)	土壤团聚体组成 Composition of soil aggregate fractions (%)				MWD (mm)
	>2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	<0.25 mm	
8	64.2±3.1aB	10.5±1.0cA	7.5±0.5dA	17.9±1.3bC	2.5±0.1B
17	71.4±3.3aA	8.9±0.5cA	8.2±0.6cA	11.4±1.1bD	2.7±0.1A
25	62.2±2.5aB	10.3±1.1cA	7.1±0.6dA	20.3±1.0bB	2.4±0.1B
43	57.2±2.5aC	9.8±0.7cA	8.3±0.5cA	24.7±1.8bA	2.2±0.1C

同行不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异显著, 同列不同大写字母表示不同植茶年限间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters in the same row indicated significant difference among different soil aggregate fractions, and different capital letters in the same column indicated significant difference among different tea cultivation ages at 0.05 level. 下同 The same below.

18.76 和 18.65 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 1~0.25 和 <0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量显著低于>1 mm 各粒径团聚体(表 4)。随着植茶年限的延长, 各粒径团聚体有机碳含量显著升高, 尤其是<0.25 mm 粒径团聚体, 其有机碳含量的增幅最大, 为 36.7% (植茶 8~43 年)。各植茶年限土壤团聚体全氮主要分布在>2 和 2~1 mm 粒径, 其含量平均值分别为 0.84 和 0.80 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; >1 mm 各粒径团聚体全氮含量显著高于 1~0.25 和<0.25 mm 粒径团聚体(表 4)。随着植茶年限的延长, 2~1 mm 粒径团聚体全氮含量无明显变化, 而其他粒径团聚体全氮含量均有所升高, 尤其是<0.25 mm 粒径团聚体, 其全氮含量增幅最大, 为 41.2% (植茶 8~43 年)。

不同植茶年限土壤团聚体碱解氮、有效磷和速

效钾含量在<0.25 mm 粒径团聚体中最高, 平均值分别为 50.43、23.06 和 68.04 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 1~0.25 和 2~mm 粒径团聚体次之; 而>2 mm 粒径团聚体碱解氮、有效磷和速效钾含量最低, 平均值分别为 43.52、16.61 和 60.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 4)。随着植茶年限的延长, 各粒径团聚体碱解氮和有效磷含量显著升高, 尤其是 1~0.25 和<0.25 mm 粒径团聚体, 其碱解氮和有效磷含量的增幅较大; 各粒径团聚体速效钾含量在植茶 8~43 年期间有所降低, 尤其是>2 mm 粒径团聚体速效钾含量的降幅最大, 为 45.6%。

2.3 土壤团聚体有机碳和养分储量变化

不同粒径团聚体对土壤有机碳和养分储量的贡献率表现为: >2 mm>0.25 mm>2~1 mm>1~0.25 mm (表 5)。例如, 不同植茶年限土壤有机碳储量有

表 4 植茶年限对土壤团聚体有机碳和养分含量的影响
Table 4 Effects of tea cultivation age on soil aggregate-associated organic C and nutrient concentrations

指标 Index	植茶年限 Tea cultivation age (a)	土壤团聚体粒径 Soil aggregate size (mm)			
		>2	2~1	1~0.25	<0.25
有机碳	8	16.47±0.38aD	16.21±0.13aD	12.62±0.13bC	9.14±0.06cC
Organic C	17	18.24±0.21aC	17.93±0.22aC	14.48±0.16bB	10.57±0.11cB
($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	25	19.71±0.27aB	19.46±0.17aB	15.05±0.21bB	10.24±0.07cB
	43	20.62±0.13aA	21.01±0.31aA	16.91±0.19bA	12.49±0.12cA
全氮	8	0.78±0.03aC	0.79±0.02aA	0.61±0.01bC	0.51±0.01cC
Total N	17	0.83±0.02aB	0.77±0.01bA	0.65±0.03cB	0.64±0.04cB
($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	25	0.84±0.04aB	0.81±0.03aA	0.70±0.04bA	0.69±0.02bAB
	43	0.91±0.01aA	0.82±0.02bA	0.71±0.02cA	0.72±0.03cA
碱解氮	8	39.81±2.13cC	41.62±1.46bC	42.71±0.80bB	45.83±2.49aC
Available N	17	43.24±1.74cB	45.98±1.38bB	47.62±2.42abAB	49.31±2.87aB
($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	25	44.73±2.49cB	46.64±0.87bB	48.87±1.47bAB	51.61±2.66aB
	43	46.29±0.87cA	49.48±2.11bA	50.37±0.38bA	54.98±2.10aA
有效磷	8	14.17±1.33cC	15.34±0.62cC	17.48±1.36bC	19.91±1.01aC
Available P	17	16.81±1.47bB	17.17±1.03bB	21.49±1.24aB	22.88±0.88aB
($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	25	17.26±0.86cAB	19.56±0.80bAB	22.37±2.51aB	23.45±1.42aB
	43	18.18±1.19dA	21.14±1.39cA	24.58±1.68bA	26.01±0.64aA
速效钾	8	78.31±3.41bA	78.49±2.47bA	81.26±1.36abA	83.61±1.47aA
Available K	17	69.47±2.87bB	71.18±1.61bB	70.89±1.28bB	75.48±3.28aB
($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	25	51.21±3.01bC	53.47±2.53abC	55.81±2.14abC	58.17±2.61aC
	43	42.58±1.36cD	50.06±0.98bC	52.41±2.00abC	54.88±0.97aC

表 5 植茶年限对土壤团聚体有机碳和养分储量的影响
Table 5 Effects of tea cultivation age on soil aggregate-associated organic C and nutrient stocks

指标 Index	植茶年限 Tea cultivation age (a)	全土 Whole- soil	土壤团聚体粒径 Soil aggregate size (mm)			
			>2	2~1	1~0.25	<0.25
有机碳	8	3830±232C	2726±112aC	438±34bB	244±23cB	421±32bC
Organic C	17	4324±118B	3307±104aA	407±21bB	303±34cAB	307±28cD
(g·m ⁻²)	25	4531±241AB	3188±184aAB	523±26bA	279±28cAB	541±30bB
	43	4807±154A	3092±163aB	541±31cA	366±41dA	808±57bA
全氮	8	185.78±7.23C	129.12±5.12aB	21.36±2.31bA	11.79±1.98cB	23.51±2.38bC
Total N	17	200.17±6.49B	150.48±6.38aA	17.48±1.28bB	13.60±1.57cB	18.60±1.02bD
(g·m ⁻²)	25	207.07±8.43AB	135.87±4.69aB	21.75±1.49cA	12.98±2.03dB	36.47±5.68bB
	43	219.49±5.61A	136.47±7.58aB	21.12±2.05cA	15.35±1.78dA	46.56±4.21bA
碱解氮	8	10.65±0.14D	6.59±0.17aC	1.13±0.06cB	0.83±0.04dB	2.11±0.02bC
Available N	17	11.49±0.11C	7.96±0.16aA	1.06±0.04cB	1.01±0.03cA	1.46±0.01bD
(g·m ⁻²)	25	12.03±0.13B	7.18±0.12aB	1.24±0.07cA	0.90±0.02dB	2.71±0.03bB
	43	12.66±0.17A	6.84±0.14aC	1.25±0.05cA	1.07±0.03dA	3.50±0.02bA
有效磷	8	4.02±0.08D	2.35±0.06aC	0.41±0.03cB	0.34±0.01dC	0.92±0.04bC
Available P	17	4.55±0.07C	3.05±0.07aA	0.39±0.01dB	0.45±0.02cB	0.66±0.06bD
(g·m ⁻²)	25	4.97±0.13B	2.79±0.09aB	0.53±0.02cA	0.41±0.01dB	1.24±0.03bB
	43	5.48±0.10A	2.73±0.08aB	0.54±0.01cA	0.53±0.01cA	1.68±0.07bA
速效钾	8	20.51±0.34A	12.96±0.24aA	2.12±0.06cA	1.57±0.08dA	3.85±0.08bA
Available K	17	18.17±0.27B	12.79±0.17aA	1.64±0.04cB	1.51±0.06dA	2.23±0.05bD
(g·m ⁻²)	25	13.72±0.19C	8.22±0.12aB	1.43±0.08cC	1.03±0.04dB	3.05±0.01bC
	43	12.17±0.23D	6.29±0.08aC	1.27±0.07cD	1.12±0.03dB	3.49±0.03bB

64.3%~76.5% 来自于>2 mm 粒径团聚体,其次是<0.25和2~1 mm 粒径团聚体,两者共占 16.5%~28.1%,而1~0.25 mm 粒径团聚体对土壤有机碳储量的贡献率最低,仅占 6.2%~7.6%。可见,>2 mm 粒径团聚体是茶园土壤有机碳和养分的主要载体。随着植茶年限的延长,除速效钾外,土壤有机碳和养分储量均有所升高,在各粒径团聚体中也呈现相同的趋势。

3 讨 论

3.1 土壤团聚体组成及稳定性特征

土壤团聚体的构成比例及稳定性是评价土壤结构的重要指标^[18],稳定的团聚体是良好土壤结构的综合体现,对改善土壤肥力、提升土壤生产力、降低土壤可侵蚀性等具有重要意义^[19]。土壤有机质是团聚体形成与稳定的主要胶结物质,土壤颗粒在持久性胶结物质的作用下形成微团聚体(<0.25 mm),随后微团聚体在暂时性和瞬时性胶结物质的作用下逐级形成大团聚体(>0.25 mm)^[8]。在植被恢复过程中,凋落物的数量和质量对土壤团聚体组成及稳定性的变化具有重要影响^[20]。随着植被恢复年限的延长,植被覆盖度逐渐变大、单株生物量增加,植物有机残体归还土壤相应增多,可供土壤微生物维系生命活动的能量充足,从而促进了土壤微生物活

性(包括微生物分泌多糖的增加和真菌菌丝的生长),有助于较大粒径团聚体的形成和团聚体稳定性的提高^[20]。在本研究中,植茶 17 年土壤团聚体 MWD 值显著大于其他年限,说明植茶 17 年茶园有较稳定的土壤团聚体结构。随着植茶年限的延长,>2 mm 粒径团聚体含量先升高后降低,在植茶 17 年时显著高于其他年限。在植茶 17 年之前,茶树凋落物的 C/N 处于较低水平,说明在此期间凋落物中易分解组分相对较多,土壤活性有机质的积累促进了较大粒径团聚体的形成^[21];而在植茶 17 年以后,由于茶树逐渐老化,凋落物数量与质量降低,从而不利于较大粒径团聚体的形成与稳定^[10]。此外,茶树凋落物数量在植茶 17 年时最多,由于大量凋落物的覆盖,可以有效减弱过多的人为干扰和雨水的直接冲刷,使得土壤团聚体稳定性在植茶 17 年时显著高于其他年限。

3.2 土壤团聚体有机碳和养分含量变化

各粒径团聚体有机碳和全氮含量是土壤有机质形成与分解的微观表征,对土壤肥力和土壤碳氮汇效应具有双重意义^[22]。一般而言,大团聚体比微团聚体含有更多有机碳、全氮以及不稳定的颗粒状有机质^[23]。在植茶过程中,土壤有机碳和全氮主要分布在较大粒径团聚体中,其含量在>1 mm 粒径团聚体中显著高于<1 mm 粒径团聚体。这归因于大团

聚体是由微团聚体在活性有机质的胶结作用下逐渐形成的,同时,大团聚体可为有机质提供物理保护,从而降低了微生物对有机质的矿化分解^[24]。各植茶年限土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量均随着团聚体粒径的减小而升高,且集中在<0.25 mm 粒径团聚体中。这是因为土壤团聚体粒径越小,比表面积越大,对土壤速效养分的吸附能力越强;同时,较小粒径团聚体中含有较多的黏粒矿物和铁铝氧化物,其对养分的强烈吸附作用也会导致土壤养分在较小粒径团聚体中积累^[25-26]。可见,<0.25 mm 粒径团聚体在茶园土壤速效养分的吸附与保持方面起重要作用。

在茶园生态系统中,由于长期施用有机肥且茶树凋落物及根系分泌物进入土壤,促使土壤有机碳和全氮含量逐年升高,尤其是在土壤微团聚体中有机碳和全氮含量的升高更为明显^[27]。此外,长期植茶也有助于土壤碱解氮和有效磷的积累。当地茶农长期偏施尿素,使得土壤碱解氮含量明显升高^[13]。土壤有效磷的积累得益于长期施用有机肥。有机肥本身含有一定数量的磷,且以有机磷为主,这部分磷易于分解释放;同时,茶园土壤有机质逐年积累,有机质含有大量羟基和羧基,这些基团能与土壤中的活性铁、铝螯合,减少磷的固定,从而使土壤有效磷含量逐年升高^[28]。土壤速效钾含量在植茶过程中显著降低,可能是因为随着茶树的生长,茶树对土壤钾素需求量增大^[29],虽然可以通过凋落物的分解为土壤积累一定量的钾素,但仍难满足茶树生长的需求。另外,由于长期偏施尿素,尿素在酸性条件下水解生成较多的 NH_4^+ ,造成土壤中 K^+ 和 NH_4^+ 不平衡,过量的 NH_4^+ 与 K^+ 竞争吸附点位,加剧了土壤 K^+ 的淋失^[29]。

3.3 土壤团聚体有机碳和养分储量变化

将不同粒径团聚体的组成比例与其中有机碳和养分含量进行综合考虑,可以全面反映各粒径团聚体对土壤有机碳和养分储量的贡献率^[30]。在本研究中,不同植茶年限土壤有机碳和养分储量主要来源于>2 mm 粒径团聚体,其次是<0.25 和 2~1 mm 粒径团聚体,而 1~0.25 mm 粒径团聚体对土壤有机碳和养分储量的贡献率最低。虽然土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量在>2 mm 粒径团聚体中相对较低,但由于土壤中该粒径团聚体的组成比例占绝对优势,所以>2 mm 粒径团聚体对土壤有效养分储量的贡献率才显示出较高值。这也进一步说明不同粒径团聚体对土壤有机碳和养分储量的贡献率与团聚

体含量高度相关。

随着植茶年限的延长,土壤有机碳、全氮、碱解氮和有效磷储量均有所升高,其积累速率在植茶 8 年至 43 年期间分别为 27.91、0.96、0.05 和 0.04 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。另外,这些元素储量的积累速率会因植茶阶段的不同而有所差异。例如,土壤有机碳储量的积累速率在植茶前期(8 年至 17 年)为 54.94 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而在植茶中期(17 年至 25 年)和后期(25 年至 43 年)分别为 25.82 和 15.31 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。可见,土壤有机碳储量的积累速率在植茶过程中逐年降低。同时,土壤全氮、碱解氮和有效磷储量也表现出类似的变化趋势。随着植茶年限的延长,土壤速效钾储量持续降低,其流失速率在植茶 8 年至 43 年期间为 0.24 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。值得注意的是,土壤速效钾储量的流失速率在植茶中期(0.56 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)要明显高于植茶前期(0.26 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和后期(0.09 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),说明植茶 17 年以后,土壤速效钾的流失现象更为严重。

在植茶过程中,土壤有机碳和养分储量变化的主要贡献粒径会因植茶阶段的不同而发生明显变化。在植茶 17 年之前,土壤有机碳、全氮、碱解氮和有效磷储量的增加量主要来源于>2 mm 粒径团聚体;而在植茶 17 年以后,其增加量主要来源于<0.25 mm 粒径团聚体。与之相反,土壤速效钾储量的减少量在植茶 17 年之前主要归因于<0.25 mm 粒径团聚体,而在植茶后期主要归因于>2 mm 粒径团聚体。

4 结 论

桂南茶园土壤团聚体稳定性在植茶过程中呈先升高后降低的变化趋势,植茶 17 年土壤具有更稳定的团聚体结构。长期植茶有助于土壤有机碳、全氮、碱解氮和有效磷的积累,但其储量的积累速率却逐年降低。另外,连续植茶不利于土壤速效钾的保持,其储量的流失速率在植茶中期处于较高水平。在茶园管理中,植茶 17 年以后可适当增施有机肥和铺草覆盖来减缓土壤团聚体稳定性降低和土壤速效钾流失加剧等问题,以保障土壤质量,促进土壤资源的可持续利用。

参考文献

- [1] 蒋健轩, 蒋文峰, 蒋文欣. 广西茶叶产业发展现状及对策探讨. 大众科技, 2018, 20(3): 72-73 [Jiang J-X, Jiang W-F, Jiang W-X. The present situation and countermeasures of the development of tea industry in

- Guangxi. *Popular Science and Technology*, 2018, **20** (3): 72–73]
- [2] 莫怀鸿. 广西茶叶产业发展现状及其可持续发展对策. 南方农业学报, 2016, **47**(6): 1051–1056 [Mo H-H. Present situation and sustainable development countermeasure of tea industry in Guangxi. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, **47**(6): 1051–1056]
 - [3] 陈玉真, 王峰, 尤志明, 等. 不同植茶年限茶园土壤的物理性状及渗透性能. 山地学报, 2016, **34**(1): 38–45 [Chen Y-Z, Wang F, You Z-M, *et al.* Soil physical properties and infiltration capability with different tea plantation ages. *Mountain Research*, 2016, **34** (1): 38–45]
 - [4] 张小琴, 赵华富, 姜艳艳, 等. 不同植茶年限茶园土壤有效营养元素分析. 热带作物学报, 2017, **38** (12): 2226–2231 [Zhang X-Q, Zhao H-F, Jiang Y-Y, *et al.* The effect of soil effective nutrient elements with different tea plantation ages. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, **38**(12): 2226–2231]
 - [5] Wang S, Li T, Zheng Z. Distribution of microbial biomass and activity within soil aggregates as affected by tea plantation age. *Catena*, 2017, **153**: 1–8
 - [6] Wang S, Li T, Zheng Z. Effects of tea plantation age on soil aggregate-associated C- and N-cycling enzyme activities in the hilly areas of Western Sichuan, China. *Catena*, 2018, **171**: 145–153
 - [7] Wang S, Li T, Zheng Z. Response of soil aggregate-associated microbial and nematode communities to tea plantation age. *Catena*, 2018, **171**: 475–484
 - [8] Six J, Bossuyt H, Degryze S, *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, **79**: 7–31
 - [9] Alagöz Z, Yilmaz E. Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey. *Soil and Tillage Research*, 2009, **103**: 419–424
 - [10] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **68**: 4–9
 - [11] Egan G, Crawley MJ, Fornara DA. Effects of long-term grassland management on the carbon and nitrogen pools of different soil aggregate fractions. *Science of the Total Environment*, 2018, **614**: 810–819
 - [12] Zou C, Li Y, Huang W, *et al.* Rotation and manure amendment increase soil macro-aggregates and associated carbon and nitrogen stocks in flue-cured tobacco production. *Geoderma*, 2018, **325**: 49–58
 - [13] 赵杏, 钟一铭, 杨京平, 等. 不同植茶年限土壤碳氮养分及胞外酶对干旱胁迫的响应. 生态学报, 2017, **37**(2): 387–394 [Zhao X, Zhong Y-M, Yang J-P, *et al.* The response of soil nutrients (carbon and nitrogen) and extracellular enzyme activities to drought in various cultivation ages from tea orchards. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 387–394]
 - [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978 [Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analysis of Soil Physicochemistry. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978]
 - [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000 [Lu R-K. Analysis of Soil and Agrochemistry. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000]
 - [16] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena*, 2003, **52**: 1–8
 - [17] Eynard A, Schumacher TE, Lindstrom MJ, *et al.* Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts. *Soil and Tillage Research*, 2005, **81**: 253–263
 - [18] An S, Mentler A, Mayer H, *et al.* Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2010, **81**: 226–233
 - [19] Wiesmeier M, Steffens M, Mueller CW, *et al.* Aggregate stability and physical protection of soil organic carbon in semi-arid steppe soils. *European Journal of Soil Science*, 2012, **63**: 22–31
 - [20] 张芸, 李惠通, 魏志超, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤有机质特征及团聚体稳定性. 生态学杂志, 2016, **35**(8): 2029–2037 [Zhang Y, Li H-T, Wei Z-C, *et al.* Soil organic matter characteristics and aggregate stability in different development stages of Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35** (8): 2029–2037]
 - [21] Tisdall JM, Oades JM. Landmark Papers: No. 1. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science*, 2012, **63**: 8–21
 - [22] Wang S, Li T, Zheng Z. Tea plantation age effects on soil aggregate-associated carbon and nitrogen in the hilly region of western Sichuan, China. *Soil and Tillage Research*, 2018, **180**: 91–98
 - [23] Li W, Zheng Z, Li T, *et al.* Effect of tea plantation age on the distribution of soil organic carbon fractions within water-stable aggregates in the hilly region of western Sichuan, China. *Catena*, 2015, **133**: 198–205
 - [24] Cheng M, Xiang Y, Xue Z, *et al.* Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2015, **124**: 77–84
 - [25] Adesodun JK, Adeyemi EF, Oyegoke CO. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates of two tropical agro-ecological soils under different land uses. *Soil and Tillage Research*, 2007, **92**: 190–197
 - [26] Emadi M, Baghernejad M, Memarian HR. Effect of land-use change on soil fertility characteristics within water-stable aggregates of two cultivated soils in northern Iran. *Land Use Policy*, 2009, **26**: 452–457
 - [27] 李玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征. 应用生态学报, 2015, **26** (1): 9–16 [Li W, Zheng Z-C, Li T-X. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus within

soil aggregates in tea plantations with different ages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 9–16]

[28] Wu W, Zheng Z, Li T, *et al.* Distribution of inorganic phosphorus fractions in water-stable aggregates of soil from tea plantations converted from farmland in the hilly region of western Sichuan, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**: 906–916

[29] 姜虹, 沙丽清. 云南澜沧县景迈古茶园土壤养分和土壤酶活性研究. 茶叶科学, 2008, **28**(3): 214–220 [Jiang H, Sha L-Q. Characteristics of soil nutrients and enzyme activity of ancient tea garden in Jingmai, Lancang, Yunnan Province. *Journal of Tea Science*, 2008, **28**(3): 214–220]

[30] Sarker JR, Singh BP, Cowie AL, *et al.* Agricultural management practices impacted carbon and nutrient concentrations in soil aggregates, with minimal influence on aggregate stability and total carbon and nutrient stocks in contrasting soils. *Soil and Tillage Research*, 2018, **178**: 209–223

作者简介 王晟强, 男, 1989 年生, 博士。主要从事茶园土壤生态恢复与重建研究。E-mail: wsq_sicau@163.com

责任编辑 张凤丽
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



封面说明

封面图片由中国科学院沈阳应用生态研究所刘华琪和王静采用无人机拍摄于中国科学院清原森林生态系统观测研究站的大湖流域(41°49′34″—51°08″ N, 124°53′53″—56°35″ E; 海拔 555~935 m)。图片中的观测塔群为中国科学院野外站网络重点科技基础设施建设项目“次生林生态系统塔群激光雷达监测平台”(简称塔群平台)的核心设施。塔群平台由 3 座观测塔组成, 覆盖各自子流域代表性森林类型, 包括典型次生林、蒙古栎林和落叶松林。每个子流域配备 1 座水文站, 在流域出口处配备总水文站。塔群平台集成了激光雷达、通量仪器、水文站网、固定标准地和数据中心, 研究森林生态系统结构量化的新方法和新指标, 探索复杂地形森林生态系统碳-水通量观测的理论与方法, 为阐明森林结构与功能的关系、服务于森林生态系统管理提供基础数据。