

doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2016.01.009

西双版纳橡胶农林复合系统土壤团聚体稳定性研究

陈春峰^{1,2} 刘文杰¹ 吴骏恩^{1,2} 刘佳庆^{1,2}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南 勐仑 666303; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究西双版纳地区橡胶-云南大叶茶、橡胶-可可、橡胶-大叶千斤拔、橡胶-咖啡、橡胶-龙血树5种典型胶农复合生态系统及单层纯橡胶林、热带雨林土壤团聚体的稳定性特征、有机碳含量以及与土壤物理性质的关系。结果表明: 与热带雨林相比, 单层橡胶林 >5 mm 水稳定性团聚体和 >0.25 mm 水稳定性团聚体均极显著降低, 平均质量直径下降了103.20%, 团聚体破坏率增加了3.6倍; 除了橡胶-咖啡复合系统外, 其余胶农复合系统 >5 mm、>0.25 mm 水稳定性团聚体及MWD均大于单层橡胶林; 与单层橡胶林相比, 胶农复合系统能使0~10 cm 土层有机碳含量增加5.30%~69.69%; 团聚体中碳含量表现为: 粒径越小, 有机碳含量就越低; 胶农复合系统不同样地间的土壤理化性质指标存在较大差异, 其中土壤容重和土壤孔隙度均与 >0.25 mm 和 >5 mm 水稳定性团聚体及与MWD呈显著线性关系。综上所述, 大面积单层纯橡胶林在改造为胶农(林)复合系统后, 其土壤质量状况得到了明显的改善。

关键词: 农林复合系统; 水稳定性团聚体; 土壤有机碳; 理化性质

中图分类号: S718.51

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2016)01-0049-08

Water-Stable Aggregation of Soil in Different Types of Rubber-Based Agroforestry Ecosystems in Xishuangbanna

Chen Chunfeng^{1,2}, Liu Wenjie¹, Wu Junen^{1,2}, Liu Jiaqing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun Yunnan 666303, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We measured the content and soil physicochemical properties of water-stable aggregates and the content of organic carbon from five rubber-based (*Hevea brasiliensis*) agroforestry ecosystems with different interplants (*Camellia sinensis*, *Theobroma cacao*, *Flemingia macrophylla*, *Coffea arabica* and *Dracaena americana*), one rubber monoculture, and tropical rain forest in Xishuangbanna, southwest China. The results showed that when compared with tropical rain forest the content of >5 mm and >0.25 mm water-stable aggregates collected from rubber monoculture significantly decreased. Meanwhile, the weight diameter (WMD) decreased by 103.20%, and PAD_{0.25} increased by 3.6 times. When compared to rubber monoculture, agroforestry ecosystems displayed higher levels of SOC content, with the increased level in the range of 5.3%–69.69%. As to the content of soil organic carbon in the aggregates, it was discovered that the smaller the aggregates were, the lower the soil organic carbon content was. Soil physicochemical properties (e.g., EC, bulk density and porosity) varied significantly among different sampling sites, whereas bulk density and porosity were both significantly related to the content of >0.25 mm and >5 mm water-stable aggregates and WMD. The above results showed that soil quality has been improved in rubber-based agroforestry

收稿日期: 2015-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(31570622/41271051/31170447)资助; 云南省基金(2014HB042/2013FA022)项目资助; 中国科学院 STS 项目(135 突破三/KFJ-EW-STs-084)资助。

第1作者: 陈春峰(1989—)男, 硕士。研究方向: 生态水文。Email: cfchen23@163.com。

通信作者: 刘文杰(1969—)男, 博士, 研究员。研究方向: 生态水文。Email: lwj@xtbg.org.cn。

ecosystems in comparison to rubber monocultures.

Key words: agroforestry ecosystems; water-stable aggregates; soil organic carbon; physical and chemical properties

土壤团聚体是由矿物颗粒和有机或无机物质结合形成的次级粒子,其主要是在生物与非生物的单独或共同作用下经由土壤微粒的破碎、凝聚和粘结的交替过程形成的^[1]。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)作为土壤团聚体重要的黏结物质,常作为表征团聚体稳定性的重要指标之一。已有研究表明,土壤团聚体的形成与SOC含量呈显著正相关性^[2];但也有研究表明不同粒径团聚体SOC含量不同,粒径越小的团聚体比表面积越大,吸附的有机颗粒物越多, SOC含量随团聚体粒径的增大而减少^[3]。不同土地利用方式下对林地SOC含量和团聚体特征有较大的影响, Sharrow等^[4]研究了黄杉(*Pseudotsuga menziesii*)、黑麦(*Lolium perenne*)以及车轴草(*Trifolium subterraneum*)构建的农林复合型固碳量与单一作物的固碳量比较,经过11 a培育,农林复合系统C含量比单独作物的高740 kg/(hm²·a) 相比较单一的树种或者田间作物,农林复合系统有较高的固碳潜力。Gupta等^[5]研究了杨树(*Populus deltoides*)与小麦(*Triticum aestivum*)、扁豆(*Vigna radiata*)组成农林复合系统土壤有机碳较单独作物提高了0.36%~0.66%,土壤团聚体MWD提高了13.3~56.9倍。土壤团聚体稳定性有机械稳定性和水稳定性之分,团聚体水稳定性主要以MWD(mean weight diameter)、GMD(geometric mean diameter)、>0.25 mm土壤团聚体破坏率(percentage of aggregate destruction, PAD_{0.25})作为表征指标, MWD、GMD越大, PAD_{0.25}越小,则团聚体水稳定性就越好,并且土壤团聚体MWD和GMD与土SOC含量呈极显著正相关^[6]。

据Huang等^[7]的研究,1950年西双版纳开始种植橡胶(*Hevea brasiliensis*),1976年种植面积为26.79 km²,到2010年已增加到9154.79 km²,35 a间橡胶种植面积由1.40%剧增到20.93%,而热带原始雨林的覆盖面积则从76.29%骤降到47.77%。植胶区单一的种植橡胶模式导致了十分严重的胶林水土流失、土壤肥力和土壤质量严重退化、生态环境恶化和生物多样性降低等问题^[8]。利用橡胶树和其他树种间作构建的人工复合群落是解决该问题比较有效的手段^[9]。经过多年的研究,有学者已找到适合与橡胶树间作的经济作物,如香蕉(*Musa paradisiaca*)^[10]、甘蔗(*Saccharum officinarum*)^[11]、菠萝(*Ananas comosus*)^[12]、咖啡(*Coffea arabi-*

ca)、可可(*Theobroma cacao*)^[13]、云南大叶茶(*Camellia sinensis* var. *assamica*)^[14]等。但目前仍缺少关于橡胶不同农林复合生态系统土壤质量状况、土壤结构性质的定量评价信息,改造西双版纳地区现存的大面积单层橡胶林也缺乏理论基础,对此需要了解自然热带雨林被开垦为单层橡胶林后的土壤退化情况,阐明橡胶农林复合系统改造单层橡胶林带来土壤质量状况改善的优势。为此,本研究选择位于中国科学院西双版纳热带植物园内的5类典型橡胶农林复合生态系统为研究对象,以单层纯橡胶林和原始热带雨林为对照研究样地,通过测定不同橡胶农林复合生态系统土壤水稳定性团聚体的分布特征、土壤水稳定性团聚体稳定性的差异及其与土壤有机质含量、电解质浓度(EC)、土壤容重和土壤孔隙度的关系,分析相同环境条件下、不同橡胶种植模式的土壤质量状况,为遴选和优化可持续利用的橡胶农林复合生态系统种植模式提供参考。

1 研究区自然概况

研究区域位于中国西南部的西双版纳傣族自治州,地处东经99°56′~101°50′,北纬21°08′~22°36′,地貌以山原为主,海拔475.0~2495.5 m^[15],全州面积19223 km²,其中山地(坡度>8°)面积占95%,山间盆地(坡度≤8°)面积占5%。西双版纳地区一年干湿季分明,可分为干季(11—4月)与雨季(5—10月),干季又分为干热季和雾凉季^[16],干热季(3—4月)气温较高,降雨量少;雨季气候湿热,降雨量占全年降雨量的87%以上;雾凉季降雨量减少,但早晚浓雾弥漫,空气湿度较大。该研究区终年受西南季风控制,属典型热带季风气候。年平均气温21.5℃,≥10℃积温7860℃,平均最低气温7.5℃,年日照时数1828 h,年降水量1557 mm,年相对湿度86%,干燥度1.01。研究样地土层非常深厚,暗红棕到红色粘壤质,类型为普通砖红壤^[17]。

2 研究方法

2.1 研究对象

本研究选取西双版纳热带植物园内新开地1990年定植的单层橡胶林,以及橡胶-咖啡(*Coffea arabica*)、橡胶-可可、橡胶-大叶千斤拔(*Flemingia macrophylla*)、橡胶-龙血树(*Dracaena americana-*

na)、橡胶-云南大叶茶等胶农复合系统为研究样地(分别以 Hb、Ca、Tc、Fm、Da、Cs 代表各研究样地),以原始热带季节雨林(Rf)为对比研究样地。橡胶树采取宽行双株的种植模式,种植规格为 2.0 m×4.5 m×14.0 m,即采用台地(2 m),窄(4.5 m),宽(14 m)间隔种植。在胶农(林)复合系统中,橡胶树宽行距之间种植间作植物,间作植物与橡胶树相隔 1 m 左右,其中云南大叶茶的种植规格为 0.6 m×1.5 m,咖啡的种植规格为 1.0 m×2.0 m,可可的种植规格为 2.5 m×2.5 m,大叶千斤拔的种植规格为 0.5 m×1.0 m,龙血树的种植规格为 2.0 m×2.0 m。样地坡度为 29°~31°,面积<0.3 hm²,各样地相距<1 km,海拔高度一致。各样地以正常生长的单株橡胶树及其窄行距和半宽行距范围内(即 4.5 m×7.0 m)的间作植物为 1 个调查小区。

2.2 土壤采样

在 2014 年 11 月,在各个林区布设 3 个典型样方(5 m×5 m),每个样方内按“S”型设置 8 个采样点。用小铲子分别采取 0~10 cm 混合土样和原状土样,剥去与铲子接触的土壤,置于纸糊盒子中(也可用面巾纸包好),避免对土样的扰动,以保持原状土壤的结构。在室内沿自然结构轻轻掰成直径约 1.2 cm 的小土块,去除植物残体、小石块以及蚯蚓等大型动物。

2.3 测定方法

水稳性团聚体参照 Haynes^[18]的方法作适当改进后进行,具体步骤为:称取 100 g 土样置于套筛(孔径

分别为 5、2、1、0.5、0.25、0.053 mm)顶部,然后将套筛放置于加有去离子水的水桶中湿润 10 min,利用自制的震荡仪以 30 次/min 上下震荡 5 min,将留在每个筛子上的土壤冲洗到铝盒中,60℃烘干 24 h 称质量,即得每粒级团聚体质量。土壤容重和土壤孔隙度用环刀法测定^[19],土壤电导率用 Soil & Water EC Meter (Simultech, Australia)测定,土壤有机质含量用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[19]。

2.4 分析方法

土壤团聚体的平均质量直径^[20]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \frac{-r_{i-1} + r_i}{2} \times w_i \quad (1)$$

式中: r_i 为第 i 个筛子的孔径(mm) $r_0 = r_1$ $r_n = r_{n+1}$; w_i 为第 i 个筛子上土壤水稳定性团聚体干质量占总团聚体的比例(%); n 为筛子的数量($n=5$)。

粒径>0.25 mm 土壤团聚体破坏率^[21]计算公式:

$$PAD_{0.25} = (A - WSA) / A \times 100\% \quad (2)$$

式中: WSA 为>0.25 mm 水稳定性团聚体的质量; A 为>0.25 mm 风干干筛团聚体的质量。

采用 Excel 2003 和 RAS 7.0 软件进行数据分析,采用单因子方差分析。

3 结果与分析

3.1 不同胶农复合系统土壤水稳定性团聚体组成 不同胶农复合林土壤水稳定性团聚体分布情况见表 1。

表 1 不同胶农复合林下土壤水稳定性团聚体含量分布

Tab. 1 Content of water-stable of aggregates in soils in different types of rubber-based agroforestry ecosystem

处理	团聚体粒级/mm					
	>5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	>0.25
单层橡胶	10.31 dD	10.3 bcB	7.84 bcBC	18.56 bcB	30.20 abAB	77.20 dCD
橡胶-云南大叶茶	11.26 dD	7.74 cB	9.54 bB	27.08 aA	28.14 bB	83.76 bcBC
橡胶-可可	28.77 bB	21.08 aA	9.62 bB	15.90 cB	16.06 dC	91.42 aAB
橡胶-大叶千斤拔	31.19 abAB	12.03 bcB	8.17 bcB	17.24 bcB	19.89 cC	88.51 abAB
橡胶-咖啡	9.38 dD	8.51 cdB	7.21 cBC	22.90 abAB	30.55 abAB	78.55 cdCD
橡胶-龙血树	21.48 cC	22.58 aA	12.20 aA	16.83 bcB	17.90 cdC	90.99 aAB
热带雨林	35.24 aA	13.12 bB	8.48 bcB	16.13 cB	20.23 cC	93.20 aA

注: 同列数值后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 同列数值后不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。

从表 1 可看出: 热带雨林转化成单层橡胶林后, >0.25 mm 和 >5 mm 水稳定性团聚体质量分数均极显著下降($P<0.01$), 降幅分别达 17.17% 和 70.74%。相比较单层橡胶林, 胶农(林)复合系统 >0.25 mm 水稳定性团聚体的含量增加幅度分别为: 橡胶-可可复合系统(18.42%) 橡胶-龙血树复合系统(17.12%) 橡胶-大叶千斤拔复合系统(14.65%) 橡胶-云南大叶

茶复合系统(8.50%), 以及橡胶-咖啡复合系统(1.75%)。其中除橡胶-咖啡复合系统和单层橡胶林的 >0.25 mm 土壤水稳定性团聚体的含量没有差别外, 其他复合系统的之间差异均达到极显著水平($P<0.01$)。橡胶-大叶千斤拔复合系统, 橡胶-可可复合系统以 >5 mm 水稳定性稳定性团聚体为主, 橡胶-龙血树复合系统以 5~2 mm 水稳定性团

聚体为主,其他胶农(林)复合系统以粒径较小的水稳定性团聚体为主。而橡胶-云南大叶茶复合系统、橡胶-咖啡复合系统和单层橡胶林 $>5\text{ mm}$ 水稳定性团聚体相近,明显小于其他橡胶农林复合系统。

3.2 不同胶农复合系统土壤团聚体结构稳定性

团聚体破坏率($\text{PAD}_{0.25}$)是评价团聚体结构稳定性重要的指标之一。不同橡胶复合林土壤水稳定性团聚体平均质量直径和 $\text{PAD}_{0.25}$ 见表2。

表2 不同胶农林复合系统水稳定性团聚体的平均质量直径和团聚体破坏率

Tab. 2 Mean weight diameter and percentage of aggregate destruction in different types of rubber-based agroforestry ecosystem

农林复合系统	平均质量直径	$\text{PAD}_{0.25}/\%$
单层橡胶	$1.25 \pm 0.18\text{ b}$	$18.48 \pm 4.42\text{ ab}$
橡胶-云南大叶茶	$1.29 \pm 0.07\text{ b}$	$15.15 \pm 0.52\text{ bc}$
橡胶-可可	$2.50 \pm 0.11\text{ a}$	$6.97 \pm 0.82\text{ d}$
橡胶-大叶千斤拔	$2.31 \pm 0.12\text{ a}$	$10.09 \pm 1.48\text{ cd}$
橡胶-咖啡	$1.16 \pm 0.11\text{ b}$	$20.44 \pm 0.80\text{ ab}$
橡胶-龙血树	$2.38 \pm 0.05\text{ a}$	$7.37 \pm 1.60\text{ d}$
热带雨林	$2.54 \pm 0.23\text{ a}$	$5.13 \pm 1.64\text{ d}$

注:同列数值后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表3 不同土地利用方式下土壤理化性质比较

Tab. 3 Effect of rubber-based agroforestry ecosystem types on soil physic-chemical characteristics

处理	$\text{EC}/(\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1})$	pH	容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙度/ $\%$	有机碳/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
单层橡胶	0.81 e	5.2	1.30 a	49.66 e	15.67 c
橡胶-云南大叶茶	0.92 d	4.5	1.20 bc	54.27 cd	20.92 b
橡胶-可可	0.36 f	5.6	1.10 de	57.71 ab	22.39 b
橡胶-大叶千斤拔	1.40 b	4.9	1.14 cd	56.45 bc	26.59 a
橡胶-咖啡	0.80 e	4.4	1.22 b	53.71 cd	16.5 c
橡胶-龙血树	1.04 c	6.3	1.25 ab	52.17 de	24.06 ab
热带雨林	1.54 a	5.8	1.05 e	59.28 a	27.36 a

注:同列数值后不同小写字母为差异显著($P<0.05$)。

从表3可以看出,全土有机碳含量在不同复合系统中存在显著差异,除橡胶-咖啡复合系统外,其他复合系统土壤有机碳含量均显著高于单层橡胶林;橡胶-云南大叶茶和橡胶-可可复合系统不存在显著差异;橡胶-大叶千斤拔、橡胶-龙血树复合系统和热带雨林不存在显著差异。不同农林复合系统中土地利用方式对土壤团聚体SOC含量的分布影响不同。不同橡胶复合林中不同粒级土壤团聚体有机碳含量分布情况见图1。从图1可以看出, $>2\text{ mm}$ 和 $1\sim2\text{ mm}$ 团聚体中有机碳含量最大为热带雨林(29.40 、 28.63 g/kg),最小是单层橡胶

从表2可以看出,不同复合林间 $\text{PAD}_{0.25}$ 存在极显著差异($P<0.01$),且除了橡胶-咖啡复合系统外,其他胶农复合系统 $\text{PAD}_{0.25}$ 均显著小于单层橡胶林,其中橡胶-可可复合系统和橡胶-龙血树复合系统 $\text{PAD}_{0.25}$ 仅为单层橡胶林的33.33%左右,这说明构建胶农复合系统能有效团聚土壤颗粒,减缓团聚体的破坏速度。在所有的试验样地中,热带雨林的团聚体破坏率最低,仅为5.13%;橡胶-咖啡复合林最高,为20.44%。平均质量直径(MWD)和团聚体破坏率($\text{PAD}_{0.25}$)有相同的变化趋势。不同复合林MWD值大小排列顺序为:热带雨林(2.54 mm),橡胶-可可复合系统(2.50 mm),橡胶-大叶千斤拔复合系统(2.31 mm),橡胶-龙血树复合系统(2.24 mm),橡胶-云南大叶茶复合系统(1.29 mm),单层橡胶林(1.25 mm),橡胶-咖啡复合系统(1.16 mm),这与不同复合林 $\text{PAD}_{0.25}$ 的排列顺序基本相反,说明 $\text{PAD}_{0.25}$ 和MWD有负相关性,并经相关性检验分析得出极显著的负相关性($r=-0.859$, $P<0.01$)。

3.3 不同胶农复合系统土壤有机碳的变化

不同橡胶复合林土地理化性质见表3。

林(17.33 、 17.08 g/kg),各橡胶农林复合系统 $>2\text{ mm}$ 和 $1\sim2\text{ mm}$ 团聚体中有机碳含量均显著大于单层橡胶林($P<0.05$),且橡胶-云南大叶茶复合系统、橡胶-可可复合系统以及橡胶-龙血树复合系统之间无显著性差异。 $1\sim0.25\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量以单层橡胶林最低(16.58 g/kg),橡胶农林复合系统均大于单层橡胶林,增幅为4.68%~52.62%。 $0.25\sim0.053\text{ mm}$ 团聚体中有机碳含量橡胶-大叶千斤拔复合系统、橡胶-龙血树复合系统、热带雨林、橡胶-云南大叶茶复合系统、橡胶-咖啡复合系统、单层橡胶林依次下降。随着土壤团

聚体粒径的减小, SOC 的含量均表现为减少的趋势。对于不同粒径团聚体来说, 除橡胶-云南大叶茶复合系统外, 其他试验样地 >2 mm 团聚体 SOC

和 $2 \sim 1$ mm 团聚体 SOC 之间差异不显著, 但与 $1 \sim 0.25$ 、 $0.25 \sim 0.053$ mm 团聚体 SOC 差异显著 ($P < 0.05$)。

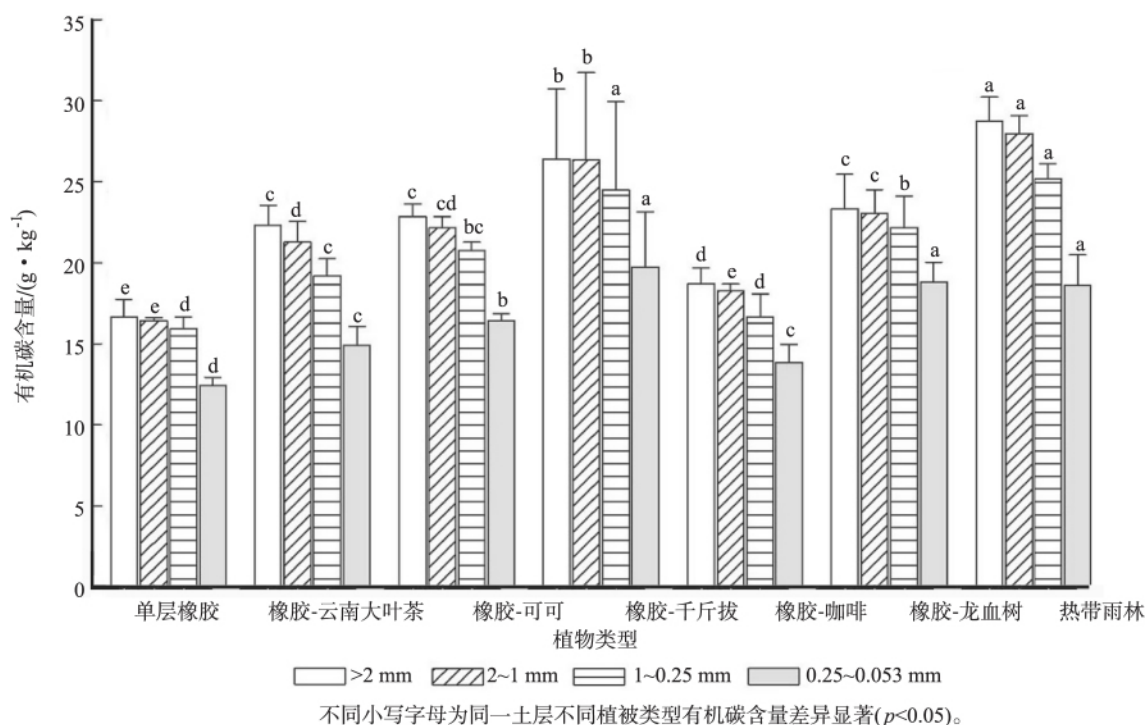


图1 不同橡胶农林复合系统中不同粒级土壤团聚体有机碳含量
Fig.1 SOC concentration in different aggregate-size fractions under different land uses

3.4 不同胶农复合系统土壤性质比较

3.4.1 土壤电导率 从表3可以看出, 不同复合林的电导率大小分别为: 热带雨林 $>$ 橡胶-大叶千斤拔复合系统 $>$ 橡胶-龙血树复合系统 $>$ 橡胶-云南大叶茶复合系统 $>$ 单层橡胶林 $>$ 橡胶-咖啡复合系统 $>$ 橡胶-可可复合系统。研究发现, 大团聚体量分布较多, MWD 较大的热带雨林和橡胶-龙血树复合系统有较高的电导率值, 除橡胶-可可复合系统外, 电导率的值和团聚体平均质量直径 (MWD) 的变化趋势相同, 经线性研究发现, 在剔除橡胶-可可复合系统样本后, 其他样地样本量 MWD 和电导率极显著相关 ($r = 0.589$, $P < 0.01$, $n = 24$)。

3.4.2 容重 土壤容重是土壤结构重要的组成部分, 土壤容重越小, 则土壤疏松多孔, 能够有利于拦渗蓄水, 减少土壤养分的流失。从表3可以看出, 不同胶农复合系统土壤容重差异显著 ($P < 0.05$), 多重比较得出: 橡胶-龙血树复合系统 $>$ 橡胶-咖啡复合系统 $>$ 橡胶-云南大叶茶复合系统 $>$ 橡胶-大叶千斤拔复合系统 $>$ 橡胶-可可复合系统,

其中, 橡胶-可可复合系统和橡胶-大叶千斤拔复合系统土壤容重较小, 接近热带雨林的值; 单层橡胶林容重极显著大于胶农复合系统 ($P < 0.01$), 说明构建橡胶农林复合林能够明显减缓土壤的板结过程, 有利于土壤养分的保留, 控制水土流失。

3.4.3 孔隙度 不同胶农复合系统土壤孔隙度和土壤容重呈相反的变化趋势 (表3), 即橡胶-可可复合系统 $>$ 橡胶-大叶千斤拔复合系统 $>$ 橡胶-云南大叶茶复合系统 $>$ 橡胶-咖啡复合系统 $>$ 橡胶-龙血树复合系统。回归分析得出土壤孔隙度和容重达到极显著相关 ($r = -0.854$, $P < 0.01$, $n = 24$)。不同胶农复合林土壤孔隙度差异显著 (表3, $P < 0.05$), 其中孔隙度最高橡胶-可可复合系统与单层橡胶林差为 8.05%, 最低的橡胶-龙血树复合系统也比单层橡胶林大 2.51%。土壤孔隙度与 >0.25 水稳定性团聚体显著相关 ($r = 0.507$, $P < 0.05$, $n = 24$), 与 >5 mm 水稳定性团聚体 ($r = 0.663$, $P < 0.01$, $n = 24$), MWD ($r = 0.55$, $P < 0.01$, $n = 24$) 呈极显著显著相关, 与团聚体破坏率并没有相关性 ($P > 0.05$) (表4)。

表4 土壤水稳定性团聚体分布及稳定性因子与土壤理化性质相关关系

Tab. 4 Correlation coefficients among the content of water-stable aggregates, indexes of aggregate's stability and soil physic-chemical characteristics

项目	>0.25mm 团聚体	平均质量直径	团聚体破坏率	EC	SOC	容重
>5mm 团聚体	0.780 **	0.954 **	-0.769 **	0.433	0.835 **	-0.724 **
>0.25mm 团聚体		0.865 **	-0.988 **	0.284	0.792 *	-0.687 **
平均重量直径			-0.859 **	0.285	0.853 **	-0.618 **
团聚体破坏率				-0.28	-0.673 **	0.628 **
EC					0.636	-0.280
SOC						-0.854 **

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

4 结论与讨论

与热带雨林相比,单层橡胶林 >5 mm 水稳定性团聚体和 >0.25 mm 水稳定性团聚体均极显著降低 ($P < 0.01$)。平均质量直径 (MWD) 下降了 103.20%, 有机碳含量降低了 42.72%, 团聚体破坏率增加了 3.6 倍。构建橡胶农林复合系统使 0~10 cm 土层有机碳含量增加 5.30%~69.69%, 土壤孔隙度增加 5.05%~15.32%, 除橡胶-咖啡复合系统外, 平均重量直径 (MWD) 增加 3.20%~100%。随着粒径增大, 团聚体内有机质浓度增大。构建橡胶农林复合系统提高了土壤大团聚体的含量, 减缓了有机质的分解与周转, 促进橡胶园地土壤对碳的固定与积累。

1) 橡胶农林复合系统对 SOC 积累的影响。构建复合林系统能够明显提高土壤大团聚体的含量, 降低团聚体的周转速率, 大团聚体的物理保护促进对颗粒状有机碳 (particulate organic matter, POM) 的固定, 从而利于碳的固定积累^[22]。Fassbender^[23] 研究发现刺桐 (*Erythrina variegata*) 和可可构建的复合林 9 a 后使 0~45 cm 土壤 SOC 含量增加 21.70%。本研究结果显示, 与热带雨林相比较, 单层橡胶林土壤 SOC 极显著下降, 降幅达 42.73%。而构建橡胶农林复合系统后, 土壤有机质积累量显著增加; 这主要是因为构建橡胶农林复合系统后, 地表枯枝落叶、植物根等主要有机质来源明显增多, 经土壤动物和土壤微生物的分解促进了土壤 SOC 的固定和积累^[24]。同时, 本研究还发现, SOC 含量与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关, 即大团聚体数量与 SOC 含量呈正相关, 这与大多数研究结果相一致^[25-26]; 与团聚体水稳定性参数 MWD 呈极显著性相关, 与 $PAD_{0.25}$ 呈极显著负相关, 这和王虹艳等^[27] 的研究结论相一致。目前, 对于不同粒径团聚体 SOC 含量高低的研究并未取得较为一致的定论。有研究认为, 有机碳主要分布于小粒径微团聚体中^[28], 当团聚体粒径越小时, 其比表面积越

大, 吸附的有机物质越多, 所以小粒径的团聚体中的 SOC 含量也就越高^[3]。也有研究认为大团聚体中的碳、氮、颗粒有机质和不稳定有机质比微团聚体多。本研究表明, 随着团聚体粒径的减小, 团聚体 SOC 含量均表现减少的趋势, 即 SOC 含量在 >2 mm、2~1 mm、1~0.25 mm、0.25~0.053 mm 团聚体中递减, 其中 0.25~0.053 mm 团聚体 SOC 含量明显小于其他粒径团聚体, 这和徐江兵等^[29] 的研究相一致。这主要是因为虽然团聚体粒径越小时, 其比表面积越大, 吸附的有机物颗粒越多, 但由于湿筛过程中水不断冲刷, 使团聚体有机颗粒物降低, 而大团聚体中有机物颗粒由于团聚体的物理保护, 有机碳流失较少, 并且大团聚体是由较新的有机物 (碳) 胶结较小的团聚体形成的, 新鲜有机物质的输入增加了大团聚有机碳的含量^[30]。

2) 土地利用方式对土壤团聚体分布及稳定性的影响。土壤团聚体的稳定性经常被用于表征土壤结构的好坏, 团聚体的团聚结构物理保护不仅可以减缓有机质分解, 也影响着微生物群落结构, 决定营养物质的吸附与解吸, 减少土壤流失和侵蚀^[31-33], 所以常作为土壤结构的物质基础和土壤肥力的载体^[34]。本研究中, 热带雨林被开垦为橡胶林地之后, 土壤 >5 mm 以及 >0.25 mm 水稳定性团聚体量极显著下降, 究其原因, 一方面是热带雨林开垦为橡胶林地后地表枯落物以及凋落物明显减少, 枯落物与凋落物是土壤有机质重要来源, 土壤颗粒缺乏有机质的胶结作用后导致团聚体稳定性降低, 进而稳定性大团聚体 (本研究主要以 >5 mm 和 >0.25 mm 2 个粒级) 的含量也下降。另一方面, 植物多样性降低, 植物根丰富度下降, 缺乏植物根茬形成的微生物胶、多糖以及植物根施加于土壤颗粒间的挤压力, 土壤团聚体稳定性也必然会下降。再者, 导致枯落物和植被覆盖度的减少, 雨滴可以直接打击地表破坏土壤团聚结构。同时, 降雨产生的径流也会侵蚀土壤, 有研究表明土壤团聚体的稳定

性和土壤侵蚀呈显著的正相关性^[35],土壤侵蚀越强,水土流失越严重,土壤团聚体就越不稳定。植被和枯落物能够有效拦截降雨,大大降低雨滴降落速度,削弱雨滴击溅地表的动能,从而控制了土壤侵蚀的发生^[36]。根据罗亲普等^[37]的研究表明,单层橡胶林人工橡胶林林冠下的土壤溅蚀率明显大于覆盖度大的2层、多层橡胶林,所以选择覆盖度较大、高度较低的间作树种与橡胶林构建多层植被覆盖可以有效减弱穿透水侵蚀力,从而控制土壤侵蚀的发生,保持土壤团聚体的稳定性。本研究中,除橡胶-咖啡复合系统外,其他胶农复合系统 $>5\text{ mm}$ 和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳定性团聚体的量显著大于单层橡胶林,且比较橡胶农林复合系统与热带雨林团聚体MWD以及 $\text{PAD}_{0.25}$ 发现,橡胶-可可、橡胶-龙血树复合系统MWD和 $\text{PAD}_{0.25}$ 与热带雨林无显著差异,橡胶-大叶千斤拔复合系统的MWD与热带雨林差异不显著,这说明橡胶树和其他树种间作能够起到生态互补的作用,构建胶农复合林能够一定程度上能够补充单层橡胶林缺失的生态环境效应。

3) 土壤团聚体稳定性与土壤理化性质关系。电导率是溶液的导电能力,它和离子浓度有关,电导率和土壤总盐量在一定的浓度范围内存在显著的正相关性。根据Domínguez等^[38]研究发现,电导率(EC)对土壤团聚体稳定性起消极作用,电导率高的土壤其大粒径团聚体分布相对比较少。但本研究中,除橡胶-可可复合系统外,其他样地中电导率值和MWD呈极显著正相关性,即除橡胶-可可复合系统土壤电导率较小外,大粒径团聚体量较多的热带雨林、橡胶-大叶千斤拔复合系统以及橡胶-龙血树复合系统土壤电导率均较高,但其原因需进一步研究。

土壤容重和土壤孔隙度是土壤物理性质的组成部分,也是评价土壤结构特征的重要指标。土壤容重较低,则土壤越疏松,土壤孔隙度也较大,有利于涵养水源,增加土壤透水性和透气性。热带雨林被开垦为橡胶林后,土壤容重极显著增大,相反土壤孔隙度极显著降低。究其原因:一方面是由于在开垦的过程中,热带雨林疏松的表层土被翻转、挤压,土壤变得压实,孔隙度下降;另一方面,单层橡胶林植被单一,没有形成有效的防护措施,林下土壤容易遭受雨水侵蚀,从而破坏土壤的结构。不同植被类型下土壤机械组成和土壤结构有明显的差异,李红等^[39]研究黄土高原退耕还林后发现,不同林地之间的土壤物理性质有较大的差异,其中土壤容重荒草坡地 $>$ 油松(*Pinus tabulaeformis*)林地 $>$ 侧柏(*Platycladus orientalis*)林地 $>$ 刺槐(*Robinia pseud-*

acacia)林地,土壤总孔隙度为刺槐林地 $>$ 油松林地 $>$ 侧柏林地 $>$ 荒草坡地,说明退耕还林后土壤结构明显改善。本研究中,橡胶农林复合林土壤容重均显著小于单层橡胶林,土壤孔隙度明显大于单层橡胶林,同时,说明构建橡胶农林复合林能够明显改善土壤结构。相关性研究发现,土壤容重和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳定性团聚体以及WMD,均呈极显著负相关性,与团聚体破坏率呈极显著正相关性,与刘晓利等^[40]的研究结果相似,这表明土壤团聚体稳定性越好,其容重就越低。

参 考 文 献

- [1] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1): 3-22.
- [2] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion validation at several levels[J]. *Catena*, 2002, 47: 133-149.
- [3] Salako F K, Hauser S. Influence of different fallow management systems on stability of soil aggregates in southern Nigeria[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32: 1483-1498.
- [4] Sharrow S H, Ismail S. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA[J]. *Agroforestry Systems*, 2004, 60(2): 123-130.
- [5] Gupta N, Kukal S S, Bawa S S, et al. Soil organic carbon and aggregation under poplar based agroforestry system in relation to tree age and soil type[J]. *Agroforestry Systems*, 2009, 76(1): 27-35.
- [6] Abid M, Lal R. Tillage and drainage impact on soil quality: I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools[J]. *Soil and Tillage research*, 2008, 100(1): 89-98.
- [7] Huang X, Yuan H, Yu F, et al. Spatial-temporal succession of the vegetation in Xishuangbanna, China during 1976-2010: a case study based on RS technology and implications for eco-restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 70: 255-262.
- [8] Werner C, Zheng X, Tang J, et al. N_2O , CH_4 and CO_2 emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China[J]. *Plant and Soil*, 2006, 289(1/2): 335-353.
- [9] Nair V D, Graetz D A. Agroforestry As An Approach to Minimizing Nutrient Loss from Heavily Fertilized Soils: the Florida Experience[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2004: 269-279.
- [10] Rodrigo V H L, Stirling C M, Teklehaimanot Z, et al. The effect of planting density on growth and development of component crops in rubber/banana intercropping systems

- [J]. *Field Crops Research*, 1997, 52(1): 95–108.
- [11] Pinto L F G, Bernardes M S, Van Noordwijk M, et al. Simulation of agroforestry systems with sugarcane in Piracicaba, Brazil [J]. *Agricultural Systems*, 2005, 86(3): 275–292.
- [12] 赵维峰, 杨文秀, 魏长宾, 等. 西双版纳地区橡胶林间作菠萝高效栽培模式[J]. *农业研究与应用* 2011(6): 28–30.
- [13] Snoeck D, Lacote R, Kéfi J, et al. Association of hevea with other tree crops can be more profitable than hevea monocrop during first 12 years [J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 43: 578–586.
- [14] 冯耀宗. 物种多样性与人工生态系统稳定性探讨[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(6): 853–857.
- [15] 朱华, 许再富, 王洪, 等. 西双版纳片断热带雨林的结 构, 物种组成及其变化的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 560–568.
- [16] 张克映. 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析[J]. *气象学报*, 1966, 33(2): 210–230.
- [17] 吴征镒, 朱彦丞. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 97–360.
- [18] Haynes R J. Effect of sample pretreatment on aggregate stability measured by wetting sieving or turbidity on soils of different cropping history [J]. *European Journal of Soil Science*, 1993, 44(2): 261–270.
- [19] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 511–512.
- [20] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1950, 14: 20–23.
- [21] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China [J]. *Geoderma*, 2001, 99(1): 123–145.
- [22] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367–1377.
- [23] Fassbender H W. Longterm studies of soil fertility in cacao-shade trees-agroforestry systems: results of 15 years of organic matter and nutrients research in Costa Rica [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1998: 150–158.
- [24] Nair P K R, Kumar B M, Nair V D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration [J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2009, 172(1): 10–23.
- [25] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2010(4): 715–722.
- [26] 李建民, 黄石德, 王姿燕, 等. 不同生态经济恢复模式对退化红壤区水稳性团聚体的影响 [J]. *西南林业大学学报*, 2015, 35(1): 1–5
- [27] 王虹艳, 吴士文, 马海洋, 等. 浙南易蚀土壤的团聚体稳定性及其稳定机理[J]. *土壤通报*, 2010(2): 429–433.
- [28] Christensen B T. Straw incorporation and soil organic-matter in macro-aggregations and particle size separates [J]. *Journal of Soil Science*, 1986, 37: 125–135
- [29] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(4): 675–682.
- [30] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 595–605.
- [31] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of soil science*, 1982, 33(2): 141–163.
- [32] Hattori T. Soil aggregates as microhabitats of microorganisms [J]. *Reports of the Institute for Agricultural Research*, Tohoku University, 1988, 37: 23–36.
- [33] Sexstone A J, Revsbech N P, Parkin T B, et al. Direct measurement of oxygen profiles and denitrification rates in soil aggregates [J]. *Soil science society of America journal*, 1985, 49(3): 645–651.
- [34] 陈恩凤, 周礼恺. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 49–53.
- [35] Coote D R, Malcolm-McGovern C A, Wall G J, et al. Seasonal variation of erodibility indices based on shear strength and aggregate stability in some Ontario soils [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1988, 68(2): 405–416.
- [36] Bormann F H, Likens G E. Pattern and Process in a Forested Ecosystem [M]. New York: Springer-Verlag, 1979.
- [37] 罗亲普, 刘文杰. 不同橡胶林林冠下的土壤溅蚀率及穿透水侵蚀力比较 [J]. *土壤通报*, 2012, 43(6): 1348–1354.
- [38] Domínguez J, Negrín M A, Rodríguez C M. Aggregate water-stability, particle-size and soil solution properties in conducive and suppressive soils to *Fusarium* wilt of banana from Canary Islands (Spain) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(4): 449–455.
- [39] 李红, 范素芳, 张光灿, 等. 黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性 [J]. *水土保持通报*, 2010, 30(1): 27–30.
- [40] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 459–465.

(责任编辑 张 坤)

