

西双版纳地区胶农(林)复合系统对 土壤团聚体的改良作用*

陈春峰^{1,2}, 吴骏恩^{1,2}, 刘佳庆^{1,2}, 刘文杰¹

(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: 研究了西双版纳地区 3 种典型胶农(林)复合生态系统(橡胶-茶叶、橡胶-可可和橡胶-大叶千斤拔)以及单层橡胶林的土壤团聚体稳定性特征以及土壤结构特征。结果表明:与单层橡胶林相比,胶农(林)复合系统的土壤物理性质得到明显改善,表现在土壤容重降低,土壤孔隙度增大,并且土壤容重和土壤孔隙度均与 $>2\text{ mm}$ 和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳定性团聚体以及与各团聚体稳定性指标呈极显著相关性;除了橡胶-茶叶复合系统外,橡胶-可可、橡胶-大叶千斤拔复合系统 $>2\text{ mm}$ 和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳定性团聚体含量极显著增多,并且随着土壤深度的增加而下降;相比较单层橡胶林,胶农(林)复合系统团聚体稳定性指标平均重量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)均显著增加,分形维数 D 值则减小,说明构建胶农(林)复合系统后团聚体更加稳定,土壤质量明显得到改善;逐步回归和差异性检验分析表明,MWD可作为该研究地区最佳土壤结构稳定性指标。

关键词: 农(林)复合系统;水稳定性团聚体;分形维数;平均重量直径;平均几何直径

中图分类号: S 157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-7971(2016)02-0326-09

土壤团聚体的数量和稳定性不仅影响着土壤的孔隙性、持水性和通透性,也决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程的速度和幅度,同时也是反映土壤结构状况的重要因素之一。它不仅在调节土壤肥力、维持土地生产力方面具有重要作用^[1],而且与土壤的抗蚀能力密切相关,是衡量土壤抗蚀性和土壤质量的重要指标^[2]。土壤团聚体稳定性评价的方法很多,Yoder^[2]通过罗列各粒级团聚体的数据,利用大于 0.25 mm 团聚体的含量($R_{0.25}$)表征团聚体的状态;van Bavel^[3]利用加权求和的方法提出平均重量直径(MWD)的概念以及Gardener^[4]根据团聚体分布服从对数正态分布原理提出了平均几何直径(GMD)的概念均广泛地应用在团聚体的稳定性分析与评价层面上;Turcotte^[5]提出了多孔径介质材料的粒径分布公式(D_v),但试验过程不能直接得到各团聚体的粒径,所以该公式并没有被广泛

运用;Tyler^[6]以及杨培岭^[7]利用质量分布取代粒径的数量分布提出了土壤颗粒粒径分布(PSD)的质量分形维数(D_m)计算公式。

根据Xu等^[8]研究,20世纪50年代西双版纳开始种植橡胶,1992年橡胶种植面积为 $87\ 000\text{ hm}^2$,到2010年橡胶种植面积达到了 $424\ 000\text{ hm}^2$,18年间增长了380%。大面积的初生林和次生林被砍伐,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,橡胶园内土壤有机碳、土壤总碳和无机氮含量都显著减少^[9],势必造成土壤结构尤其是土壤团聚体的破坏。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的比较有效的手段。为此,中国科学院CERN西双版纳热带雨林生态站构建了橡胶-大叶千斤拔、橡胶-可可、橡胶-茶叶、橡胶-柚子等胶农(林)复合系统。目前对这些胶农(林)复合系统初步研究表明,其林内的

* 收稿日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(41271051, 31170447); 云南省应用基础研究计划(2014HB042, 2013FA022)。

作者简介: 陈春峰(1989-),男,江西人,硕士生,主要从事生态水文研究。E-mail: cfchen23@163.com。

通信作者: 刘文杰(1969-),男,云南人,研究员,主要从事生态水文研究。E-mail: lwj@xtbg.org.cn。

光、温、湿状况得到了极大地改善^[10],但对胶农(林)复合系统土壤质量状况,土壤结构性质尤其是土壤团聚体的稳定性研究尚未深入。为此,本研究选取位于中国科学院西双版纳热带植物园内的3种胶农(林)复合生态系统(橡胶-茶叶、橡胶-可可和橡胶-大叶千斤拔)为研究对象,以单层橡胶林为对照研究样地,探讨在橡胶园区构建胶农(林)复合系统后,土壤水稳定性团聚体的分布以及土壤团聚体水稳定性的变化,旨在为改造现存的大面积单层橡胶林、改善胶园生态环境、构建可持续发展的生态胶园模式,提供切实的科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况 西双版纳傣族自治州位于中国的西南部,云南省的最南端,地理位置为 $99^{\circ}56'E \sim 101^{\circ}50'E$, $21^{\circ}08'N \sim 22^{\circ}36'N$,海拔 $475 \sim 2495.5 \text{ m}$ ^[11],全州面积 $19\,223 \text{ km}^2$,其中山地(坡度 $>8^{\circ}$)面积占95%,山间盆地(坡度 $\leq 8^{\circ}$)面积占5%。西双版纳地区一年干湿季分明,可分为干季(11—次年4月)与雨季(5—10月),干季气温较高,降雨量少;雨季气候湿热,降雨量占全年降雨量87%以上。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°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $7\,860^{\circ}\text{C}$,平均最低气温 7.5°C ,年日照时数 $1\,828 \text{ h}$,年降水量 $1\,557 \text{ mm}$,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^[12]。

试验于2014—2015年进行,设置单层橡胶林(*Hevea brasiliensis*)、橡胶-云南大叶茶(*Camellia sinensis*)复合系统、橡胶-可可(*Theobroma cacao*)复合系统以及橡胶-大叶千斤拔(*Flemingia macrophylla*)复合系统4个处理。其中橡胶树1990年种植,云南大叶茶、可可以及大叶千斤拔2005年种植。施肥采用复合肥(含N、P以及K)穴施的方式,即在橡胶树间挖个坑,填入肥料,用量约为每年每公顷 40 kg N ,分3月、9月份进行。橡胶树采取宽行双株的种植模式,种植规格为 $2 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} \times 14 \text{ m}$,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,其中大叶茶的种植规格为 $0.6 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,可可的种植规格为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,大叶千斤拔的种植规格为 $0.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。

1.2 实验设计

1.2.1 土壤采样 在2014年12月,在各个林区布设3个典型样方($5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$),每个样方内按“S”型设置8个采样点在 $0 \sim 5$ 、 $5 \sim 15$ 、 $15 \sim 30 \text{ cm}$ 等3个土层采集原状土样。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。

1.2.2 测试方法 土壤团聚体的分布状况和稳定性用干筛法和湿筛法^[13]。干筛:取200 g风干土样,放入最大孔径10 mm的土筛上面,套筛下边的土筛孔径分别为10、8、5、2、1、0.5 mm和0.25 mm,以35次/min手工上下震荡5 min,测定各孔径筛子上土样质量,准确至0.01 g,并计算出各团聚体质量分数。湿筛:称取50 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, 65°C 烘干24 h,放置常温后称重。土壤容重和土壤孔隙度用环刀法测定^[14]。

1.2.3 数据处理 土壤团聚体的平均重量直径(mean weight diameter, MWD)以及平均几何直径(GMD(geometric mean diameter)^[15])为:

$$\text{MWD} = \sum x_i y_i, \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \left\{ \frac{\sum y_i \ln x_i}{\sum y_i} \right\}. \quad (2)$$

公式中 x_i 为第 i 和 $i-1$ 个筛子孔径的平均值; y_i 为第 i 个筛子上土壤水稳定性团聚体干重占总团聚体的比例(%); n 为筛子的数量($n=5$)。

分形维数 D 的计算采用杨培岭等^[7]推导的公式:

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right)^{3-D}. \quad (3)$$

对公式(4)两边取对数,可得:

$$\lg \left[\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right), \quad (4)$$

其中 \bar{x}_i 为某级团聚体平均直径, $M(r < \bar{x}_i)$ 为粒径小于 \bar{x}_i 的团聚体的质量, M_T 为团聚体的总质量, x_{\max} 为团聚体最大粒径。根据公式(3)和(4)可以计算出分形维数 D 值。

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。

2 结果与分析

2.1 土壤基本物理性质

2.1.1 土壤容重 图 1 是不同胶农(林)复合系统不同土壤深度土壤容重的结果,土层为 0~5 cm 和 5~15 cm 的土壤容重变化趋势均为单层橡胶林>橡胶-茶叶复合系统>橡胶-千斤拔复合系统>橡胶-可可复合系统.土层为 15~30 cm 的土壤容重为单层橡胶林>橡胶-千斤拔复合系统>橡胶-茶叶复合系统>橡胶-可可复合系统.单层橡胶林以及橡胶-茶叶复合系统不同土壤层次土壤容重没有显著差异,而橡胶-可可、橡胶-大叶千斤拔复合系统差异显著.

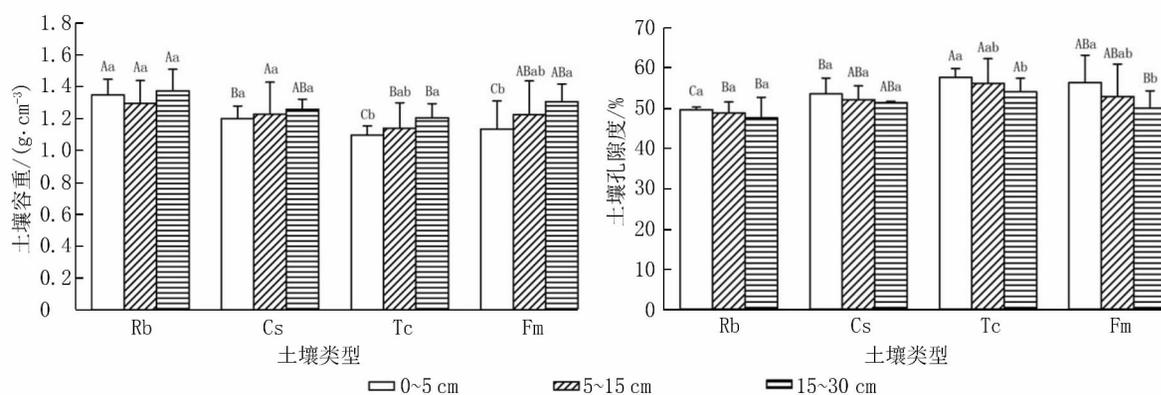
利用 MANOVA 进行 4 种胶农(林)系统、3 个土壤层次的多因素方差分析,结果显示,不同胶园种类对土壤容重的影响($f = 25.066$, $df = 3$, $p < 0.001$) 大于土壤层次对土壤容重的影响($f = 13.207$, $df = 2$, $p < 0.001$),而胶园种类与土壤层次交互作用对土壤容重没有显著的影响($f = 0.686$, $df = 6$, $p > 0.05$).

2.1.2 土壤孔隙度 土壤孔隙度在 47.66% ~ 57.71% 间变化(图 1).土壤孔隙度的变化趋势和土壤容重刚好相反,根据相关性分析,土壤孔隙度与土壤容重呈极显著负相关($r^2 = -0.99^{**}$).土壤孔隙度在表层最大,随着土壤深度的增加,土壤孔隙度变小,但单层橡胶林(Rb)以及橡胶-茶叶复合系统(Cs)不同土壤层次土壤孔隙度并没有显著差异(图 1).不同复合林类型土壤孔隙度变化差异性(f

$= 24.371$, $df = 3$, $p < 0.001$) 大于土壤层次土壤孔隙度变化差异性($f = 11.567$, $df = 2$, $p < 0.001$),复合林种类与土壤层次交互作用对土壤容重没有显著的影响($f = 0.735$, $df = 6$, $p > 0.05$).

2.2 土壤团聚体数量分布

2.2.1 团聚体粒径分布 团聚体可以分成 $>2000 \mu\text{m}$ (巨团聚体), $1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ (大团聚体), $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ (小团聚体), $53 \sim 250 \mu\text{m}$ (微团聚体), 以及 $<53 \mu\text{m}$ (粉粒)^[16].由表 1 可得,在 0~5 cm 土层,不同胶农(林)复合系统土壤水稳定性团聚体的分布存在显著差异($p < 0.05$), $>2 \text{ mm}$ 和 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳定性团聚体含量大小顺序均为橡胶-可可复合系统>橡胶-大叶千斤拔复合系统>橡胶-茶叶复合系统 \approx 单层橡胶林,这表明橡胶-可可复合系统和橡胶-大叶千斤拔复合系统能够有效地增加团聚体的数量,改善土壤的质量.在 5~15 cm 土层,不同胶农(林)复合系统在 $>2 \text{ mm}$ 和 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳定性团聚体数量分布均呈显著差异,分别是橡胶-可可复合系统>橡胶-大叶千斤拔复合系统>单层橡胶林>橡胶-茶叶复合系统.在 15~30 cm 土层,橡胶-茶叶、橡胶-可可以及橡胶-大叶千斤拔复合系统 $>2 \text{ mm}$ 水稳定团聚体量分别比单层橡胶林多了 184.5%、264.89% 以及 152.58%.除了单层橡胶林 5~15 cm 土层 $>2 \text{ mm}$ 和 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳定性团聚体大于 0~5 cm 土层外,其他胶农(林)复合林 $>2 \text{ mm}$ 和 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳定性团聚体的数量随着土壤深度的增加而显著减少.



Rb: 单层橡胶林; Cs: 橡胶-茶叶复合系统; Tc: 橡胶-可可复合系统; Fm: 橡胶-千斤拔复合系统.不同大写字母表示同一土层不同胶农(林)复合系统之间差异显著,不同小写字母表示同一复合系统不同土层之间的差异显著($p < 0.05$)

图 1 不同胶农(林)复合系统土壤容重和土壤孔隙度的对比

Fig.1 Effect of rubber-based agroforestry ecosystem types on soil bulk density and porosity

表1 不同胶农复合林下土壤水稳定性团聚体质量分数

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

深度/cm	处理	团聚体粒径/mm				
		>2	2~0.25	0.25~0.053	<0.053	>0.25
0~5	Rb	28.44Ca	51.89Ab	4.43Aab	15.23Aab	80.34Bab
	Cs	28.54Ca	55.22Ab	2.87ABa	13.37Aab	83.76Ba
	Tc	59.46Aa	31.96Cc	1.88Bb	6.71Bb	91.42Aa
	Fm	51.38Ba	37.13Bc	1.94Ba	9.54Ba	88.51Aa
5~15	Rb	31.51Ca	52.50Bb	3.04ABb	12.95Ab	84.01Ba
	Cs	20.28Db	63.68Aa	3.93Aa	12.11ABb	83.96Ba
	Tc	47.08Ab	41.27Cb	2.06Bb	9.60BCb	88.35Ab
	Fm	38.26Bb	49.67Bb	3.59Aa	8.47Ca	87.93Aa
15~30	Rb	6.58Cb	68.93Aa	6.21Aa	18.28Aa	75.51Cb
	Cs	18.72Bb	62.18Ba	3.33Ba	15.78ABa	80.89ABb
	Tc	24.01Ac	56.22Ca	4.90ABa	14.88ABa	80.23Bc
	Fm	16.62Bc	66.84Aa	4.28ABa	12.26Ba	83.46Ab

不同大写字母表示同一土层不同胶农(林)复合系统之间差异显著,不同小写字母表示同一复合系统不同土层之间的差异显著($p < 0.05$)

MANOVA 分析表明,土壤层次对>2 mm 和>0.25 mm水稳定性团聚体量分布的作用($df = 2, f = 281.134, p < 0.001$; $df = 2, f = 43.261, p < 0.001$) 大于植被类型对其作用($df = 3, f = 137.857, p < 0.001$; $df = 3, f = 29.91, p < 0.001$),复合农林种类和土壤层次交互作用对>2 mm 和 0.25 mm 水稳定性团聚体量的分布影响也极显著($df = 6, f = 20.937, p < 0.001$; $df = 6, f = 4.235, p < 0.01$).

2.2.2 平均重量直径(MWD)和平均几何直径(GMD) 图2是各土壤层次不同橡胶复合林土壤团聚体平均重量直径,在0~5 cm 土层下复合林间MWD呈极显著差异($f = 70.469, p < 0.001$).主要表现在:橡胶-可可复合系统(2.50 mm)和橡胶-千斤拔复合系统(2.31 mm)的MWD显著大于橡胶-茶叶复合系统(1.28 mm)以及单层橡胶林(1.25 mm).同时4种复合林在5~15 cm 土层下MWD值也均达到显著差异,橡胶-可可复合系统(1.94 mm) > 橡胶-千斤拔复合系统(1.64 mm) > 单层橡胶林(1.40 mm) > 橡胶-茶叶复合系统(1.05 mm).15~30 cm 土层下除了单层橡胶外MWD值较小外,其他复合系统MWD差异不大.单层橡胶林MWD值随着土壤深度的增加先增加后减小,其他复合林MWD值均随着土壤深度的增加而显著地减小.

GMD与MWD变化有所不同,在0~5 cm 土层下橡胶-可可复合系统(1.76 mm) > 橡胶-千斤拔复合系统(1.49 mm) > 单层橡胶林(0.98 mm) > 橡胶-茶叶复合系统(0.96 mm).5~15 cm 土层GMD各复合系统差异显著.表现在橡胶-可可复合系统(1.35 mm) > 橡胶-千斤拔复合系统(1.15 mm) > 单层橡胶林(1.01 mm) > 橡胶-茶叶复合系统(0.84 mm).

MANOVA 分析表明,MWD($f = 65.10, df = 2, p < 0.001$)和GMD($f = 15.72, df = 2, p < 0.001$)受土壤层次的影响均大于复合林种类对MWD值($f = 29.01, df = 3, p < 0.001$)以及GMD($f = 9.52, df = 3, p < 0.001$)的影响.复合林种类与土壤层次交互作用对MWD有极显著的影响($f = 25.00, df = 6, p < 0.001$),但对GMD没有显著影响($f = 1.36, df = 6, p > 0.05$).

2.2.3 D值分析 土壤分形维数反映了土壤结构的几何形状,粘粒含量越高,质地越细,分形维数越高.对各胶园0~5 cm 土层土壤团聚体D值进行两因素方差分析.结果显示胶园间的D值差异极其显著($f = 44.96, df = 3, p < 0.001$),多重比较的结果显示除了单层橡胶林和橡胶-茶叶复合系统外,其他胶园土壤团聚体D值均达到显著差异;同时,在

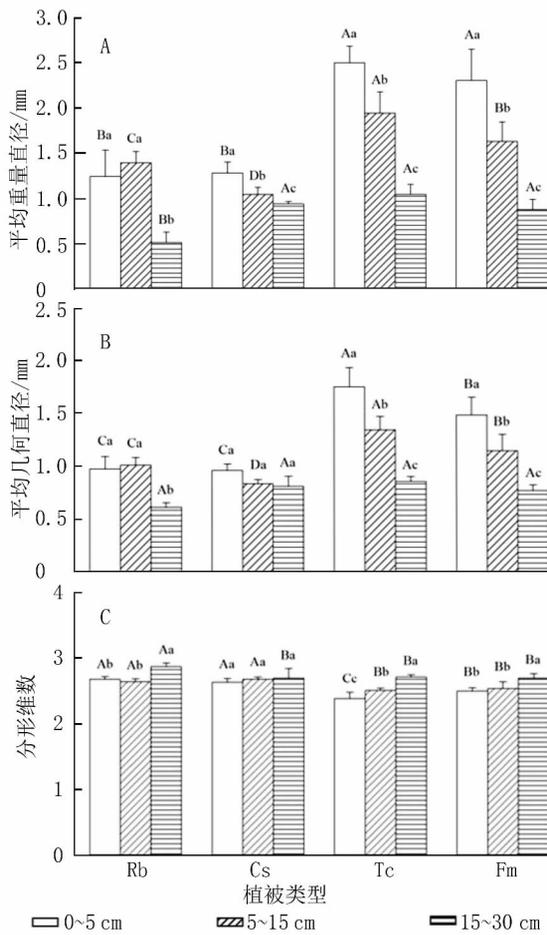


图 2 不同胶农(林)复合系统土壤团聚体平均重量直径 (MWD) (A)、平均几何直径 (GMD) (B) 以及分形维数 D (C) 的对比

Fig.2 Effect of rubber-based agroforestry ecosystem types on mean weight diameter of aggregates (MWD), mean geometry diameter (GMD) and D value

5~15 cm 土层 ($f=18.29, df=2, p<0.001$) 和 15~30 cm 土层下 ($f=18.52, df=2, p<0.001$), 各胶园土壤团聚体的 D 值均呈极显著差异。多重比较结果是: 在 5~15 cm 土层, 橡胶-茶叶复合系统>单层橡胶林>橡胶-千斤拔复合系统>橡胶-可可复合系统, 在 15~30 cm 土层, 单层橡胶林>橡胶-可可复合系统>橡胶-千斤拔复合系统>橡胶-茶叶复合系统, 但除了单层橡胶林和其他复合林之间有显著差异外, 其他复合林之间并没有显著性差异。

3 讨论

3.1 土地利用方式对团聚体分布的影响 土壤团聚体是由矿物颗粒和有机或者无机物质结合形成的次级粒子, 其主要是在生物与非生物单独或共

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^[17]。Six 等^[18]认为>0.25 mm 的大团聚体是土壤结构体的表征, 其含量越多, 说明土壤团聚性越好, 团聚体越稳定。Candan^[19]认为>0.25 mm 团聚体的分布量对土地利用方式和管理变化最为敏感, 也有许多学者将粒级>2mm 团聚体的量作为反映土壤团聚体分布和稳定性的重要指标。

本研究中, 除了茶叶-橡胶复合系统>2 mm 和>0.25 mm 团聚体含量和单层橡胶林没有显著性差异外, 橡胶-可可复合系统和橡胶-大叶千斤拔复合系统>2 mm 和>0.25 mm 团聚体的含量显著大于单层橡胶林(表 1)。究其原因, 一方面是由于橡胶林下土壤有机质的输入主要依赖橡胶树的落叶、腐根以及人工施肥, 构建胶农复合林后, 地表凋落物、覆盖物增多, 土壤有机碳的输入增加。有机碳是土壤团聚体的重要粘结物质, 新输入的有机碳首先出现在大团聚体中, 大团聚体的形成速度比微团聚体快^[20], 并且大团聚体有机碳含量一般大于小团聚体的有机碳含量, 由于团聚体对有机碳富集作用, 从而加快了大团聚体的形成。另一方面, 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^[21], 降雨过程中雨滴的击打以及降雨产生的径流会侵蚀土壤。单层橡胶林由于林种单一, 植被覆盖面积小, 枯落物和覆盖物覆盖度降低, 由于土壤长期遭受侵蚀, 地表板结, 水土流失严重, 从而土壤团聚体破坏严重。而构建胶农林复合系统大大增加了植被覆盖面积, 能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。以上几方面可以得出构建胶农复合林增加了土壤大团聚体的含量并明显提高了土壤团聚体的稳定性。

本研究中, 利用单因素分析 4 种复合胶农(林)复合系统>2 mm 和>0.25 mm 水稳定性团聚体分布状况可以得出, 构建胶农(林)复合系统能够极显著地提高>2 mm 和>0.25 mm 水稳定性团聚体的含量 ($f=7.663, df=3, p<0.001$; $f=8.377, df=3, p<0.001$)。多重比较结果显示除了橡胶-茶叶复合系统>2 mm 和>0.25 mm 水稳定性团聚体的含量和单层橡胶林没有显著性差异外, 橡胶-可可复合系统、橡胶-大叶千斤拔复合系统>2 mm 和>0.25 mm 水稳定性团聚体均极显著大于单层橡胶林。

3.2 团聚体水稳定性随土壤深度的变化 本研究结果表明, 水稳定性大团聚体含量随着土层的加深

呈减小趋势. 主要原因一方面是土壤地表有大量的新鲜残体以及枯落物的输入, 经过微生物分解后, 有机质含量较高, 促进了大团聚体的形成. 下层土壤的有机质含量相对较低, 土壤大团聚体形成较少, 表现出随着土壤深度的增加, 有机质含量降低, 土壤大团聚体数量减少的趋势^[22]. 这与刘艳等^[23]对北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体分布研究结果相一致, 即土壤浅层大团聚体的量明显多于深层大团聚体的量. 另一方面, 大团聚体含量和土壤的紧密度有关. 随着土壤深度的增加, 各胶园垂直剖面上土壤密度也增大, 土壤被压实, 孔隙度减小, 从而阻止了植物根生长. 有研究表明植物的根能够把土壤中较小的颗粒团聚成大团聚体, 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. 并且橡胶树属于浅根生长植物, 约 55% 的根系活动主要生长在土壤表层 10 cm 处, 随着土壤深度加深, 根系活动减少^[24].

研究发现, >2 mm 水稳定性团聚体量和土壤容重呈极显著负相关性 ($r^2 = -0.756$, $df = 36$, $p < 0.01$), 与土壤孔隙度呈极显著正相关性 ($r^2 = 0.733$, $df = 36$, $p < 0.01$). 同样的, >0.25 mm 水稳定性团聚体的量和土壤容重也呈极显著负相关性 ($r^2 = -0.704$, $df = 36$, $p < 0.01$), 与土壤孔隙度呈极显著正相关性 ($r^2 = 0.686$, $df = 36$, $p < 0.01$) (表 2). 这些可以证明土壤紧密度能够阻止植物根穿透深层土壤, 真菌等微生物在此环境下也不能很好的生长, 从而降低植物根分泌液等多糖类物质以及细菌产生的球囊霉素, 导致水稳定性大团聚体分布的减少^[25]. 其次, 表征团聚体稳定性因子的平均重量直径 (MWD) 和平均几何直径 (GMD) 都随着土壤深度的增加而增大, 分形维数 (D) 随着土壤上深度的加深而减少, 并且其和土壤容重和土壤孔隙度均呈极显著相关性, 从而可以证明随着土壤深度的加

深, 土壤水稳定性大团聚体分布量减少, 团聚体稳定性也下降, 这和张鹏等^[26]的研究一致.

3.3 土壤结构指标对比 对 MWD、GMD 和 D 值和 >2 mm 团聚体含量、 >0.25 mm 团聚体含量作逐步回归分析如表 3. 结果表明, 3 种土壤结构指标和 >2 mm 团聚体量、 >0.25 mm 团聚体含量都存在极显著的线性关系 (表 3), 并且 MWD 反映水稳定性团聚体的变化同 GMD 有相同的趋势, 且相关系数为 0.726, 与 D 值有相反的趋势, 相关系数为 -0.947, 这说明各种土壤结构指标均能反映水稳定性团聚体的分布变化. 通过各土壤结构指标和 >2 mm 水稳定性团聚体和 >0.25 mm 水稳定性团聚体拟合多重线性模型, MWD: $Y = -0.282 + 0.36X_1 + 0.07X_2$ ($r^2 = 0.994$, $df = 46$, $p < 0.01$); GMD: $Y = 0.184 + 0.016X_1 + 0.004X_2$, $r^2 = 0.749$, $df = 46$, $p < 0.01$); D 值: $Y = 3.581 - 0.005X_1 - 0.009X_2$ ($r^2 = 0.967$, $df = 46$, $p < 0.01$). 模型结构均达到极显著水平, 所以并不能比较各土壤结构指标的优劣.

祁迎春^[27]比较几种团聚体稳定性指标发现 MWD 和 GMD 只有在适宜的振动时间范围内才能反映各种性状土壤的团聚体水平差异, 而用分形维数作为指标, 表征各类土壤团聚水平的可信度不高. 苏静等^[28]对土壤团聚体平均重量直径、分形维数和 >0.25 mm 团聚体含量等团聚体稳定性评价方法进行比较得出 3 种方法均能评价土壤结构状况, 但分形维数方法较优. 本实验通过对水稳定性团聚体的 MWD、GMD 以及 D 值分析表明, MWD 比 GMD 以及 D 值更能反映不同处理间团聚体的差异性分布, 对不同胶园不同土壤深度土壤水稳定性团聚体的差异更加敏感 (图 3). 本文虽然没有验证各参数指标的孰优孰劣, 但考虑到 MWD 能够较好区分不同胶园不同土壤深度土壤团聚体分布状况, 所以本文认为团聚体平均重量直径 MWD 的结果更为可取.

表 2 土壤水稳定性团聚体分布、团聚体稳定性因子与土壤理化性质之间的相关性

Tab.2 Correlation coefficients among the content of water-stable aggregates, indexes of aggregate's stability and soil physical characteristics

项目	>2 mm 团聚体	>0.25 mm 团聚体	平均重量直径 MWD	平均几何直径 GMD	分形维数 D
土壤容重	-0.756 **	-0.704 **	-0.745 **	-0.615 **	0.765 **
孔隙度	0.733 **	0.686 **	0.723 **	0.593 **	-0.743 **

** $p < 0.01$; $n = 36$

表 3 土壤 3 种结构指标和 >2 mm 以及 >0.25 mm 团聚体之间的线性关系

Tab.3 Regression relation between MWD ,GMD ,D and the amount of material in each aggregate size class

自变量	回归模型	相关系数
>2 mm 团聚体含量(X_1)	$MWD=0.217+0.38X_1$	0.994**
>0.25 mm 团聚体含量(X_2)	$MWD=-7.794+0.109X_2$	0.872**
>2 mm 团聚体含量(X_1)	$GMD=0.482+0.017X_1$	0.749**
>0.25 mm 团聚体含量(X_2)	$GMD=-3.185+0.05X_2$	0.66**
>2 mm 团聚体含量(X_1)	$D=2.874-0.008X_1$	0.951**
>0.25 mm 团聚体含量(X_2)	$D=4.712-0.025X_2$	0.909**

** $p<0.01$; $n=36$

参考文献:

- [1] ARSHAD M A ,COEN G M.Characterization of soil quality: physical and chemical criteria [J]. American Journal of Alternative Agriculture ,1992 ,7(1/2) : 25-31.
- [2] YODER R E.A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J].Agronomy Journal ,1936 ,28(5) : 337-351.
- [3] 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(C) : 20-23.
- [4] GARDNER W R.Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution 1 ,2 [J].Soil Science Society of America Journal ,1956 ,20(2) : 151-153.
- [5] TURCOTTE D L ,SCHUBERT G.Geodynamics: Applications of continuum physics to geological problems [M]. New York: John Wiley and Sons ,Inc ,1982: 450.
- [6] TYLER S W ,WHEATCRAFT S W.Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations [J].Soil Science Society of America Journal ,1992 ,56(2) : 362-369.
- [7] 杨培岭 ,罗远培 ,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征 [J].科学通报 ,1993 ,38(20) : 1 896-1 899.
YANG P L ,LUO Y P ,SHI Y C.Fractal features of soils characterized by the weight of particle size distribution [J].Chinese Science Bulletin ,1993 ,38(20) : 1 896-1 899.
- [8] XU J ,GRUMBINE R E ,BECKSCHAFER P.Landscape transformation through the use of ecological and socioeconomic indicators in Xishuangbanna ,Southwest China , Mekong Region [J]. Ecological Indicators ,2014 ,36: 749-756.
- [9] LI H ,MA Y ,AIDE T M ,et al.Past ,present and future land-use in Xishuangbanna ,China and the implications for carbon dynamics [J]. Forest Ecology and Management ,2008 ,255(1) : 16-24.
- [10] 冯耀宗.人工群落: Man-made community [M].昆明: 云南科技出版社 ,2007.
FENG Y Z.Artificial communities: Man-made community [M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Press ,2007.
- [11] 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.
ZHU H ,XU Z F ,WANG H ,et al.Effects of fragmentation on the structure ,species composition and diversity of tropical rain forest in Xishuangbanna ,Yunnan [J]. Acta Phytocologica ,2000 ,24(5) : 560-568.
- [12] 吴征镒 ,朱彦丞.云南植被 [M].北京: 科学出版社 ,1987: 97-360.
WU Z Y ,ZHU Y C ,JIANG H Q.The vegetation of Yunnan [M].Beijing: Science Press ,1987: 97-360.
- [13] KEMPER W D ,ROSENAU R C.Aggregate stability and size distribution [J].Physical and Mineralogical Methods ,1986: 425-442.
- [14] 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.
- [15] PINHEIRO E F M ,PEREIRA M G ,ANJOS L H C.Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil [J]. Soil and Tillage Research ,2004 ,77(1) : 79-84.
- [16] YAMASHITA T ,FLESSA H ,JOHN B ,et al.Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: effect of land use [J].Soil Biology and Biochemistry ,2006 ,38(11) : 3 222-3 234.

- [17] BRONICK C J ,LAL R.Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio ,USA [J].Soil and Tillage Research 2005 ,81(2) : 239-252.
- [18] SIX J ,ELLIOTT E T ,PAUSTIAN K.Soil structure and soil organic matter II .A normalized stability index and the effect of mineralogy [J].Soil Science Society of America Journal 2000 ,64(3) : 1 042-1 049.
- [19] CANDAN F ,BROQUEN P.Aggregate stability and related properties in NW Patagonian Andisols [J].Geoderma 2009 ,154(1) : 42-47.
- [20] GALE W J ,CAMBARDELLA C A ,BAILEY T B.Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates [J].Soil Science Society of America Journal , 2000 ,64(1) : 201-207.
- [21] 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.
- [22] OELBERMANN M ,VORONEY R P.Carbon and nitrogen in a temperate agroforestry system: using stable isotopes as a tool to understand soil dynamics [J].Ecological Engineering 2007 29(4) : 342-349.
- [23] 刘艳,查同刚,王伊琨,等.北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].应用生态学报 2013 24(3) : 607-613.
LIU Y ,ZHA T G ,WANG Y K et al.Soil aggregate stability and soil organic carbon characteristics in *Quercus variabilis* and *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing area [J].The Journal of Applied Ecology 2013 24(3) : 607-613.
- [24] GEORGE S ,SURESH P R ,WAHID P A ,et al.Active root distribution pattern of *Hevea brasiliensis* determined by radioassay of latex serum [J].Agroforestry Systems , 2009 76(2) : 275-281.
- [25] HOOEMAN J J ,SA J C M J ,REEDER R.The biology of soil compaction [J].Soil Tillage Res ,2011 ,68: 49-57.
- [26] 张鹏,贾志宽,王维,等.秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学 2011 45 (8) : 1 513-1 520.
ZHANG P ,JIA Z K ,WANG W ,et al.Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China [J].Sci Agric Sin 2012 45(8) : 1 513-1 520.
- [27] 祁迎春,王益权,刘军,等.不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J].农业工程学报 2011 27(1) : 340-347.
QI Y C ,WANG Y Q ,LIU J et al.Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2011 27(1) : 340-347.
- [28] 苏静,赵世伟.土壤团聚体稳定性评价方法比较[J].水土保持通报 2009 29(5) : 114-117.
SU J ,ZHAO S W.Comparison of the analysis methods for soil aggregate stability [J].Bulletin of Soil and Water Conservation 2009 29(5) : 114-117.

The improvement of soil aggregates by building rubber-based agroforestry ecosystems in Xishuangbanna ,Southwest China

CHEN Chun-feng^{1,2} , WU Jun-en^{1,2} , LIU Jia-qing^{1,2} , LIU Wen-jie¹

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

Abstract: Stability and physical properties of the soil aggregates from three rubber-based(*Hevea brasiliensis*) agroforestry ecosystems with different interplants(*Camellia sinensis* ,*Theobroma cacao* ,*Flemingia macrophylla*) , and a monoculture rubber forest were studied in Xishuangbanna ,Southwest China.The results showed that the physical properties of rubber-based(*Hevea brasiliensis*) agroforestry ecosystems presented lower soil bulk density and higher soil porosity in comparison with the monoculture ecosystem.Bulk density and porosity in rubber agroforestry ecosystems were both significantly related to the contents of water-stable aggregates (>2 mm and >

0.25 mm) and stability indices of the aggregates; The contents of water-stable aggregates (>2 mm and >0.25 mm) in *Hevea brasiliensis*-*Theobroma cacao* and *Hevea brasiliensis*-*Flemingia macrophylla* ecosystem (except the *Hevea brasiliensis*-*Camellia sinensis* agroforestry ecosystem) were much more than that of the monoculture ecosystem and decreased by the soil depth; Compared to the monoculture ecosystem, MWD and GMD in rubber-based agroforestry ecosystems were both significantly increased, while dimension value (D) was significantly decreased. The results proved that soil aggregates and soil quality were getting more stable and significantly improved after the construction of rubber-based agroforestry ecosystems. Stepwise regression and variance analysis indicated that mean weight diameter (MWD) can be considered as a good index for the soil structure stability in this area.

Key words: agroforestry ecosystem; water-stable aggregates; soil aggregate fractal dimension (D); mean weight diameter (MWD); geometric mean diameter (GMD)