

西双版纳长期橡胶种植对土壤固碳和氮的影响研究

孙燕瓷^{1,2}, 马友鑫^{1*}, 曹坤芳³, 李红梅¹, 何建芬⁴, 刘昌平⁴, 刘洪平⁵, 李斌⁵

(1. 中国科学院 西双版纳热带植物园重点实验室, 云南 勐仑 666303; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广西大学 林学院, 亚热带农业资源保护与利用国家重点实验室, 广西 南宁 530004; 4. 西双版纳州曼沙农场管理委员会, 云南 景洪 666100; 5. 景洪市景洪农场管理委员会农林水综合服务中心, 云南 景洪 666100)

摘要 为加强西双版纳地区环境友好胶园的建设, 以不同林龄的橡胶林为研究对象, 分析橡胶林生长过程中土壤碳氮含量与储量的变化。结果表明 在 34 年的橡胶种植过程中土壤碳、氮含量与储量均有不同程度的降低, 碳分别减少 3.33 g kg^{-1} 和 21.23 t hm^{-2} , 氮分别减少 0.20 g kg^{-1} 和 1.3 t hm^{-2} ; 土壤碳的消耗主要发生在橡胶林种植早期 (≤ 9 年林龄), 橡胶种植 9 年以后土壤固碳量逐渐增加, 并在 21 年林龄后达到相对稳定的状态。相比而言, 土壤氮含量的降低持续时间较长 (3 ~ 21 年林龄), 土壤容重轻微的变化即可对土壤氮储量产生影响, 土壤氮储量随时间的变化没有明显的规律性。在 1 m 深土壤剖面上, 土壤碳、氮的变化主要发生在 30 cm 以上的土层 (每层按 10 cm 计)。协方差分析表明, 年干胶产量对土壤碳氮含量与储量没有显著影响, 但在割胶初期 (9 年林龄) 土壤碳氮含量均明显降低, 割胶极有可能引起一些生理生态方面的变化, 从而影响土壤的碳氮含量与储量。

关键词 橡胶种植; 土壤碳氮; 割胶; 西双版纳

中图分类号 S718.5 文献标识码: A 文章编号 0564-3945(2015)02-0412-08

孙燕瓷, 马友鑫, 曹坤芳, 李红梅, 何建芬, 刘昌平, 刘洪平, 李斌. 西双版纳长期橡胶种植对土壤固碳和氮的影响研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 412-419

SUN Yan-ci, MA You-xin, CAO Kun-fang, LI Hong-mei, HE Jian-fen, LIU Chang-ping, LIU Hong-ping, LI Bin. Impacts of Long-term Rubber Plantation on Soil Carbon and Nitrogen Sequestration in Xishuangbanna [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 412-419

橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 野生种群分布于南美洲亚马逊流域的热带雨林, 其原产地为赤道南北纬 10° 之间, 海拔低于 600 m 的区域^[1,2]。但由于世界上对天然橡胶的需求量的不断增加, 橡胶树已被广泛引种和扩种到了东南亚等许多较高纬度和较高海拔地区^[3-5]。在东南亚, 橡胶种植面积已超过 150 万公顷, 且其扩张仍在继续^[4,5]。伴随着橡胶林的快速扩张, 大面积的热带森林被破坏。这种土地利用方式的变化势必对生态环境造成影响, 如对生态系统中的碳循环^[6-10]、土壤理化性质等的影响^[11-13]。

Cheng et al. (2007) 在海南的研究指出, 橡胶种植 30 年后土壤肥力 (N、P、K 含量) 持续降低。当次生林变为橡胶林后, 土壤养分及植物碳输入明显减少, 土壤有机物、土壤微生物碳、土壤总碳 (总氮) 及其储量显著降低^[14,15]。与热带森林相比, 橡胶林中的土壤氮矿化速率明显低于热带森林^[16], 土壤氮多以铵态氮的形式存在, 土壤氮流失的风险较高^[13]。然而, 橡胶林土壤碳含量和储量的变化与树龄、气候条件、地理环境和割

胶等人类活动密切相关^[17-19]。以上研究着重于某一个或某几个林龄的橡胶林与天然林的对比研究, de Blécourt et al. (2013, 2014) 虽然考虑了 5 ~ 46 年林龄的橡胶林, 但橡胶林多属于个体户, 管理上千差万别。因此, 目前关于橡胶林种植对土壤碳氮的影响的研究还没有一致的结论。

地处热带北缘的西双版纳地区, 在过去的几十年里橡胶种植面积迅速扩张^[6,20], 其面积已超过该区土地面积的 20%^[5]。橡胶种植已引起该地区饮用水缺乏、生物多样性减少、碳氮水循环格局改变等诸多生态环境问题^[9,10,20-26]。当地政府与科研机构正在合力推动环境友好胶园的建设, 因此准确了解橡胶林生长过程中 (不同林龄) 土壤碳氮含量与储量的变化对环境友好胶园的建设与管理具有指导意义。本研究以西双版纳 6 个龄林 (3、7、9、21、27 和 34 年林龄) 的纯胶林为研究对象, 结合农场干胶产量数据, 主要研究目的包括: ① 阐明橡胶林生长过程中土壤碳氮的变化特点及其垂直分布特征; ② 分析林龄和土层厚度对土壤碳氮的影响及其

收稿日期 2014-08-15 修订日期 2014-10-30

基金项目 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050206) 资助

作者简介 孙燕瓷 (1979-), 女, 云南曲靖人, 在职博士, 研究实习生, 主要从事热带森林生态学研究。E-mail: sunyanci@xtbg.ac.cn

* 通讯作者 E-mail: may@xtbg.ac.cn

交互作用;③分析割胶对土壤碳氮的影响。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于云南省景洪市 (21°27' ~ 22°36' N, 100°25' ~ 101°31' E) 西南部的景洪农场,属热带北缘季风气候,干湿季分明。年降雨量 1162.1 mm, 其中 85%左右的降雨集中在雨季 (5 ~ 10 月), 干季有雾 (11 ~ 次年 4 月); 年均温 22.3 °C, 最热月 25.8 °C (5 ~ 6 月), 最冷月 16.5 °C (1 月), 年均日照时数为 2152.9 h。该农场主要是人工植被类型橡胶林, 有小面积的热带季节雨林分布; 土壤以砖红壤 (湿润铁铝土, Udic Ferralols) 为主, 及少量的冲积土 (冲积新成土, Alluvic

Primosols) 和水稻土 (水耕人为土, Stagnic Anthrosols), 括号内为中国土壤系统分类名称^[27]。

1.2 样地布置

为了尽量保持橡胶林的管理措施、气候和环境条件的一致性, 2013 年初在景洪农场工作人员的帮助下, 布置了 6 个林龄 (3、7、9、21、27 和 34 年林龄) 的纯胶林样地。每个林龄设置 5 块至少间隔 100 m 的 400 m² (20 m × 20 m) 的重复样地, 各样地海拔在 587 ~ 629 m 之间, 坡度低于 30°。橡胶树的种植密度为 9 m × 2.5 m, 研究样地基本信息见表 1。胶树定植后第 7 年的下半年 (9 月份) 开始割胶, 割胶制度为每刀二分之一树围、每两天一刀; 每年施肥两次, 6 月和 9 月喷 2 次杀虫剂, 施用除草剂除草。

表 1 研究样点橡胶林的基本信息

Table 1 Basic information of rubber plantation in this study

林龄 Stand Ages (a)	地理位置 Locations	海拔 Elevations (m)	坡度 Gradients (°)	种植密度 Plant density (m × m)	冠层高度 Canopy heights (m)	土壤类型 Soil types	土壤酸碱度 Soil pH	土壤碳氮比 Soil C/N ratios
3	21°53'5.2" N, 100°49'21.8" E	588	10 ~ 19	9 × 2.5	6.05 ± 6.05	湿润铁铝土	4.18 ± 0.12	12.48 ± 1.16
7	21°52'43.7" N, 100°49'21.7" E	587	7 ~ 14	9 × 2.5	11.94 ± 11.94	湿润铁铝土	4.84 ± 0.18	11.45 ± 0.93
9	21°52'57.8" N, 100°49'25.4" E	590	10 ~ 17	9 × 2.5	13.65 ± 13.65	湿润铁铝土	4.73 ± 0.23	8.62 ± 1.85
21	21°52'57.8" N, 100°49'25.4" E	629	11 ~ 29	9 × 2.5	18.92 ± 18.92	湿润铁铝土	4.77 ± 0.16	11.86 ± 0.84
27	21°52'32.7" N, 100°49'35.6" E	607	5 ~ 26	9 × 2.5	20.41 ± 20.41	湿润铁铝土	4.75 ± 0.15	9.27 ± 1.23
34	21°52'17.8" N, 100°49'36.1" E	626	6 ~ 28	9 × 2.5	22.07 ± 22.07	湿润铁铝土	4.86 ± 0.15	12.01 ± 0.87

1.3 研究方法

1.3.1 土壤样品采集与处理 2013 年 4 月至 5 月, 在各样地内按对角线法选 9 个取样点, 用内径为 4 cm 的土钻, 按 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 50 cm、50 ~ 100 cm 分层取土, 同一土层的土样捏碎充分混合, 采集 3 个混合土样, 每块样地共采集 15 个混合土样。同时, 在每块样地内的代表性地段挖掘一个 1 m 深的土壤剖面, 用环刀 (体积 100 cm³) 按照上述层次分层取土, 每层取 3 个环刀样品, 用于土壤体重的测定。考虑到干季和雨季测量的土壤容重可能会存在偏差, 因此每个林龄随机抽取 3 块样地测量了雨季的土壤容重。土壤养分含量委托中国科学院西双版纳热带植物园中心实验室进行测定。

土壤容重的计算方法为^[28]:

$$\text{土壤容重 (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{环刀内干土生 (g)}}{\text{环刀体积 (100 cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (1)$$

各层土壤碳 (氮) 储量 C_s (N) 的计算方法为^[29]:

$$C_s = C \times BD \times D \div 10 \quad (2)$$

$$N_s = N \times BD \times D \div 10 \quad (3)$$

式中 C_s (N) 为各土层土壤碳 (氮) 储量 (t hm⁻²), C (N) 为各土层的土壤碳 (氮) 含量 (g kg⁻¹), BD 为土壤容重 (g cm⁻³), D 为土层厚度 (cm)。1 m 深土壤总碳 (氮)

储量为各土层碳 (氮) 储量之和。

1.3.2 干胶产量数据的获取 干胶产量数据为 2009 年景洪农场的普查数据, 收集了从开始割胶到割胶 30 年左右景洪农场不同品系 (GT1, RRIM600, PR107 等) 和树段位的干胶产量数据, 橡胶树林龄等于割胶年龄加 7 年。

1.3.3 数据处理与分析 统计分析用 SPSS 16.0, 用重复测量方差分析 (Repeated - measures ANOVA) 来评价土壤容重的季节差异显著性; 用二元方差分析 (Two - way ANOVA) 分析土壤容重、碳含量与碳储量、氮含量与氮储量在不同林龄和土层的分布特征; 产胶量、树龄对橡胶林土壤碳 (氮) 储量的影响用协方差分析 (Analysis of covariance)。差异显著性水平均设为 $\alpha = 0.05$ 。图表制作采用 SigmaPlot 12.5 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤容重

不同林龄橡胶林 1 m 深土壤在干季的平均土壤容重为 (1.08 ± 0.01) g cm⁻³, 略高于雨季的 (1.07 ± 0.01) g cm⁻³, 但差异不显著 ($P > 0.05$) (图 1), 随后的分析中采用两次测量结果的平均值。

3 ~ 34 年林龄橡胶林的土壤容重在 0.94 ~ 1.28 g cm⁻³

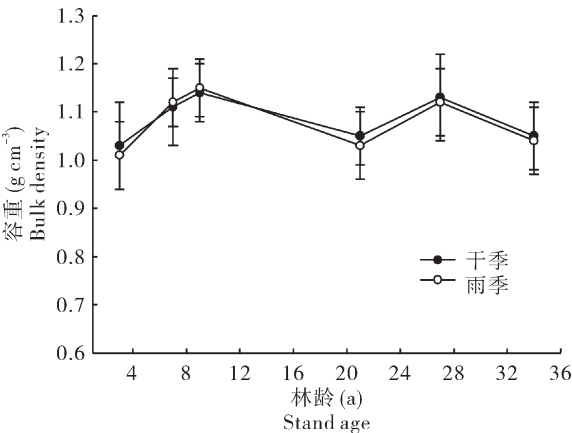


图 1 干季和雨季的土壤容重比较
Fig. 1 Comparisons of soil bulk density between dry and rainy seasons

表 2 土壤容重的动态变化

Table 2 Dynamic change of soil bulk density

土层 Soil depths (cm)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)					
	3 年生 3- year old	7 年生 7- year old	9 年生 9- year old	21 年生 21- year old	27 年生 27- year old	34 年生 34- year old
0 ~ 10	0.94 ± 0.08 a	1.08 ± 0.05 b	1.03 ± 0.04 ab	1.03 ± 0.04 ab	1.06 ± 0.09 b	1.06 ± 0.10 b
10 ~ 20	1.00 ± 0.05 a	1.10 ± 0.04 b	1.12 ± 0.05 b	1.02 ± 0.05 a	1.10 ± 0.06 b	1.02 ± 0.06 a
20 ~ 30	1.01 ± 0.04 a	1.13 ± 0.05 b	1.14 ± 0.05 b	1.05 ± 0.04 ac	1.10 ± 0.03 bc	1.10 ± 0.04 bc
30 ~ 50	1.03 ± 0.04 a	1.12 ± 0.05 ac	1.18 ± 0.08 bc	1.07 ± 0.03 a	1.15 ± 0.02 bc	1.12 ± 0.04 ac
50 ~ 100	1.03 ± 0.07 a	1.15 ± 0.04 b	1.28 ± 0.08 c	1.08 ± 0.03 ad	1.23 ± 0.04 c	1.10 ± 0.03 bd

注 表中数据为 5 块重复样地的平均值 ± 标准差 数据后不同字母表示同一行数据在 0.05 水平上差异显著。

表 3 林龄和土层对土壤容重、碳含量与储量、氮含量与储量的影响

Table 3 Effects of stand ages and soil depths on soil BD, soil carbon contents (SCC) and carbon storage (SCS), soil nitrogen contents (SNC) and storage (SNS)

项目 Items	林龄 Stand Ages		土层 Soil depths		林龄 × 土层 Stand Ages × Soil depths		R ²
	F values	P values	F values	P values	F values	P values	
自由度 (DF)	5	5	4	4	20	20	
容重 (BD)	25.259	< 0.001	20.035	< 0.001	1.818	0.026	0.669
碳含量 (SCC)	32.422	< 0.001	178.566	< 0.001	0.877	0.615	0.882
碳储量 (SCS)	13.930	< 0.001	259.532	< 0.001	1.475	0.103	0.905
氮含量 (SNC)	13.278	< 0.001	247.573	< 0.001	1.084	0.375	0.900
氮储量 (SNS)	14.547	< 0.001	606.470	< 0.001	4.460	< 0.001	0.956

橡胶林的土壤碳含量在幼林阶段持续降低,在割胶第二年(9 年林龄)橡胶林的土壤碳含量最低,平均 13.27 g kg⁻¹ ($P < 0.05$)。随着割胶的继续进行,土壤碳含量逐渐升高,在 34 年林龄橡胶林中土壤碳含量有较大的恢复(平均 17.32 g kg⁻¹),但仍低于 3 年林龄时的土壤碳含量(平均 20.65 g kg⁻¹),总体上表现为土壤碳的消耗(图 2a)。由图 3a 可知,从 3 到 34 年林龄橡胶林,土壤碳含量的降低以 10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 50 cm 三层较明显,分别减少 4.30 g kg⁻¹, 4.78 g kg⁻¹, 4.84 g kg⁻¹ ($P < 0.05$),而 0 ~ 10 cm 由于不断施肥的原因土壤碳含量的变化最小(-0.32 g kg⁻¹)。在橡胶树生长的不同阶段,9 年林龄以前橡胶林土壤碳含量的降低同样以中间

之间(表 2),由表 2 可知林龄和土壤深度对土壤容重有极显著的影响($P < 0.001$),并伴有明显的交互作用($P < 0.05$)。随着橡胶树的生长,土壤容重呈双峰型变化:从 3 至 9 年林龄土壤容重增加,在 9 年林龄时达到第一个较大的峰值(平均 1.15 g cm⁻³) ($P < 0.05$) 第二个相对较弱的峰值为 27 年林龄橡胶林(平均 1.13 g cm⁻³)。在 1 米土壤剖面上,土壤容重随土层深度的增加而增加,由 0 ~ 10 cm 到 50 ~ 100 cm 层土壤容重增加 0.11 g cm⁻³ ($P < 0.05$)。

2.2 土壤碳含量与碳储量

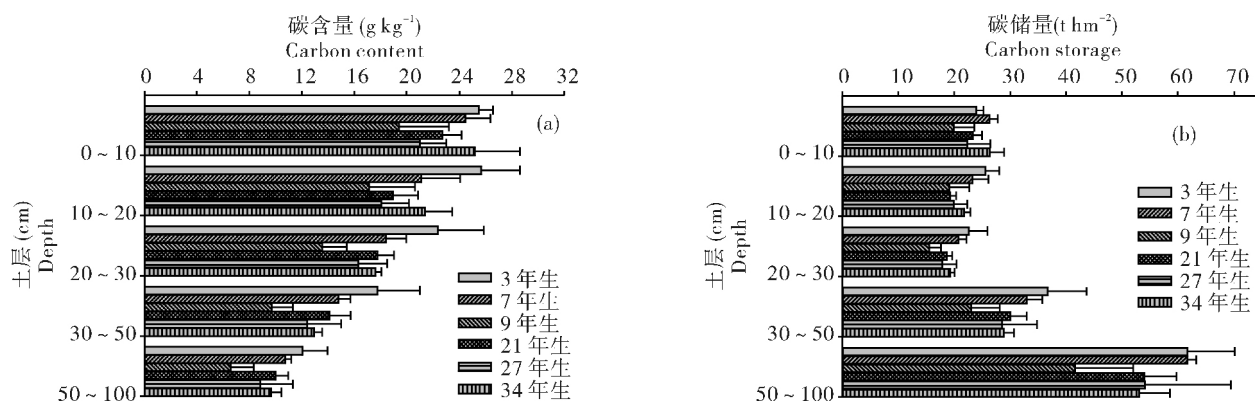
方差分析显示林龄和土层深度对土壤碳含量与储量有极显著的影响($P < 0.001$),但交互作用不明显(表 3)。

的三层的为主,与 3 年林龄相比土壤碳含量分别减少 8.54 g kg⁻¹, 8.81 g kg⁻¹, 8.03 g kg⁻¹ ($P < 0.05$),而 0 ~ 10 cm 和 50 ~ 100 cm 层的变化较小,分别为 -6.06 g kg⁻¹ 和 -5.48 g kg⁻¹。9 年林龄以后土壤碳含量总体上呈逐渐恢复的趋势,但其恢复的量随土壤深度的增加而降低。

3 ~ 34 年林龄橡胶林 1 m 深土体的碳储量大小顺序为 9 年 < 27 年 < 21 年 < 34 年 < 7 年 < 3 年林龄,分别为 119.12 t hm⁻², 142.67 t hm⁻², 145.24 t hm⁻², 149.29 t hm⁻², 164.90 t hm⁻² 和 170.52 t hm⁻² (图 2b)。在 34 年的生命周期中橡胶林土壤碳储量总体降低了 21.23 t hm⁻² ($P < 0.05$),土壤碳储量随林龄的变化与土壤碳含量极为相似(图 3b)。从 3 到 9 年林龄,橡胶林土壤碳储量减

少了 30.14%, 相当于 51.40 t hm^{-2} 碳被释放 ($P < 0.05$); 从 9 到 34 年林龄, 橡胶林土壤碳储量逐渐恢复并达到一个相对稳定的状态, 在这一时期约 30.17 t hm^{-2} 碳被固定在土壤中 ($P < 0.05$)。由图 3b 还可以看出, 从 3 到 34 年林龄, 橡胶林土壤碳储量除 0 ~ 10 cm 层增加 2.48 t hm^{-2} 外, 其余各层均显著降低 ($P < 0.05$)。在橡胶树生长的各个阶段, 土壤碳储量的变化均以 50 ~ 100 cm 层

最高 ($P < 0.05$)。然而, 若考虑土层厚度因素, 如按照 10 cm 每层来计算, 则在 3 ~ 9 年林龄阶段土壤碳储量的消耗主要发生在 20 ~ 30 cm 土层 (-7.12 t hm^{-2}) ($P < 0.05$), 在 9 ~ 34 年林龄阶段土壤碳的固定主要表现在 0 ~ 10 cm 土层 (6.52 t hm^{-2}) ($P < 0.05$), 随后为 20 ~ 30 cm 土层 (3.80 t hm^{-2}) ($P < 0.05$)。



注 图中数据为 5 块重复样地的平均值 $\pm$ 标准差。下同。

图 2 土壤碳含量与碳储量

Fig. 2 Soil carbon contents and carbon stocks

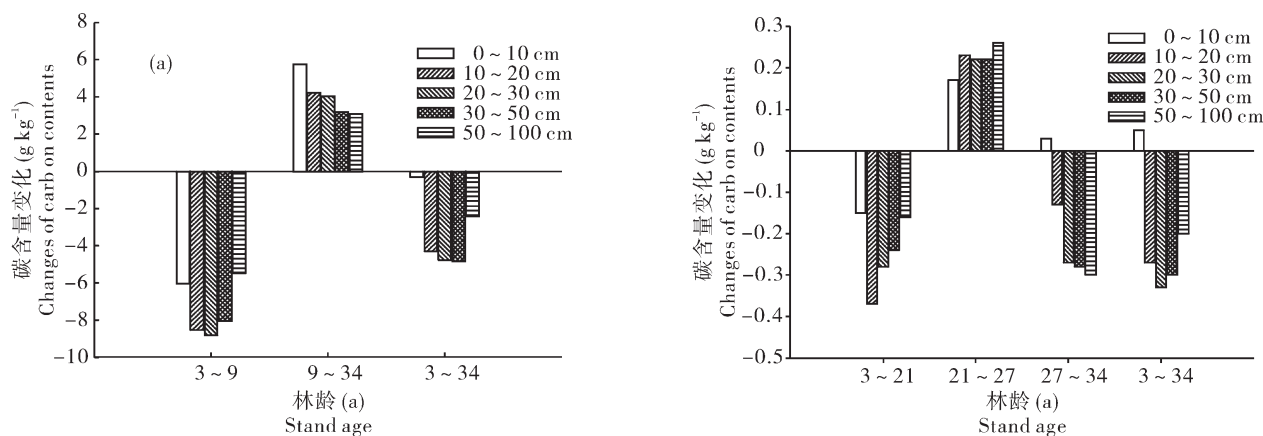


图 3 土壤碳含量与碳储量的阶段性变化

Fig. 3 Changes of soil carbon contents and carbon stocks

以上分析表明, 在 34 年的生命周期中橡胶林土壤碳储量被消耗 21.23 t hm^{-2} , 且存在一个由碳排放为主到碳固定为主的转变过程。橡胶种植及随后的管理主要对 30 cm 以上的土壤碳含量与储量产生影响, 而施肥对 0 ~ 10 cm 层的影响较大。

2.3 土壤氮含量与氮储量

不同林龄橡胶林的土壤氮含量在 $0.89 \sim 2.12 \text{ g kg}^{-1}$ 之间 (图 4a), 林龄和土层深度对土壤氮含量有极显著的影响 ($P < 0.001$), 交互作用不显著 (表 3)。从 3 ~ 34 年林龄橡胶林, 土壤平均氮含量降低 0.20 g kg^{-1} 。随着橡胶

树的生长, 土壤氮含量的变化与土壤碳含量的变化略有不同。首先, 从 3 ~ 21 年林龄土壤氮含量持续降低 (-1.40 g kg^{-1}), 表明在种植橡胶后土壤氮消耗与流失的时间要比土壤碳的消耗长的多。其次, 橡胶产量降低后土壤氮含量没有增加, 表现为 34 年林龄橡胶林土壤平均氮含量仅 1.43 g kg^{-1} , 较 27 年林龄橡胶林低 0.19 g kg^{-1} 。由图 5 可知, 在 34 年的生命周期中土壤氮的降低以 20 ~ 30 cm 层最明显 (-0.33 g kg^{-1}) ($P < 0.05$)。其中, 在 3 ~ 21 年林龄阶段, 土壤氮含量的降低主要发生在 10 ~ 20 cm 层 (-0.37 g kg^{-1}) ($P < 0.05$)。在 21

~ 27 年林龄和 27 ~ 34 年林龄阶段, 土壤氮含量的变化均以 50 ~ 100 cm 层最大, 分别为 0.26 g kg^{-1} 和 -0.30 g kg^{-1} ($P < 0.05$)。与土壤碳含量相似, 由于施肥的原因, 土壤氮含量在 0 ~ 10 cm 层的变化比较复杂。

3 ~ 34 年林龄橡胶林在 1 m 深土体的氮储量在 $12.54 \sim 16.47 \text{ t hm}^{-2}$ 之间 (图 4b), 林龄和土层深度对土壤氮储量有极显著的影响 ($P < 0.001$), 并具有极显著的交互作用 (表 3)。在 34 年的生命周期中, 橡胶林

土壤总氮储量降低 1.3 t hm^{-2} , 但 0 ~ 10 cm 层的土壤氮含量却增加 0.28 t hm^{-2} , 土壤氮储量的降低主要发生在 10 ~ 20 cm 层 (0.23 t hm^{-2})。由于土壤中的氮含量较低, 导致土壤氮储量随时间的变化易受土壤容重的影响, 没有明显的规律性。尤其是在橡胶种植的早期 (≤ 9 年林龄), 虽然土壤氮含量逐渐降低, 但因人类活动使土壤容重增加, 土壤氮储量也增加 (图 4b)。

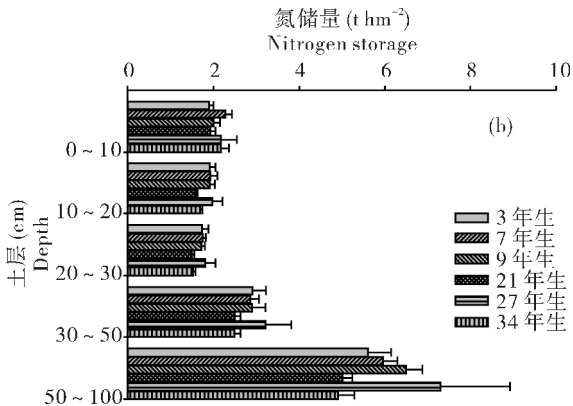
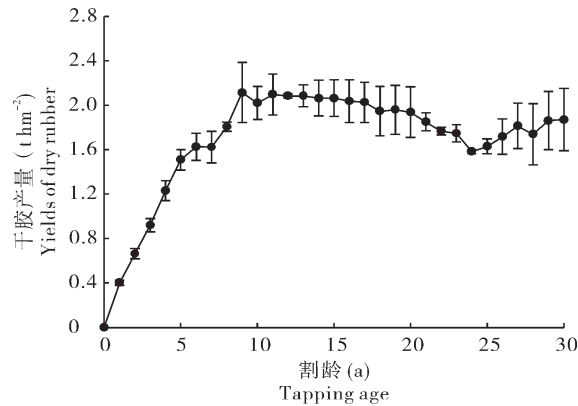


图 4 土壤氮含量与氮储量
Fig. 4 Soil nitrogen contents and nitrogen storage

2.4 干胶产量对土壤碳含量与储量、氮含量与储量的影响

根据景洪农场工作人员的介绍, 在景洪农场橡胶树种植后第 7 年的 9 月份开始全面割胶, 橡胶树的经济寿命在 30 年左右。由图 6 可知, 在开始割胶的 9 年里干胶产量不断增加, 并在之后的 4 ~ 5 年中维持较高的产量 (平均为 $1.94 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。割胶 14 年以后, 干

胶产量略有降低且波动较大。由于林龄或割龄在很大程度上制约着干胶的产量, 因此在分析干胶产量对土壤碳 / 氮储量的影响时采用协方差分析。分析结果表明干胶产量对土壤容重、土壤碳 / 氮含量与储量均没有直接的影响 ($P > 0.05$), 土壤容重、土壤碳 / 氮含量与储量的变化主要是受林龄的影响 ($P < 0.05$) (表 4)。

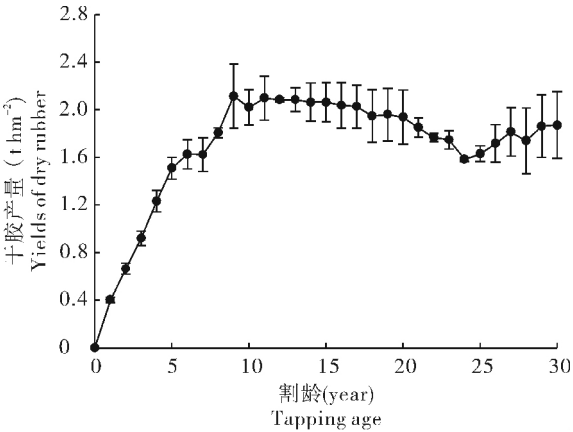
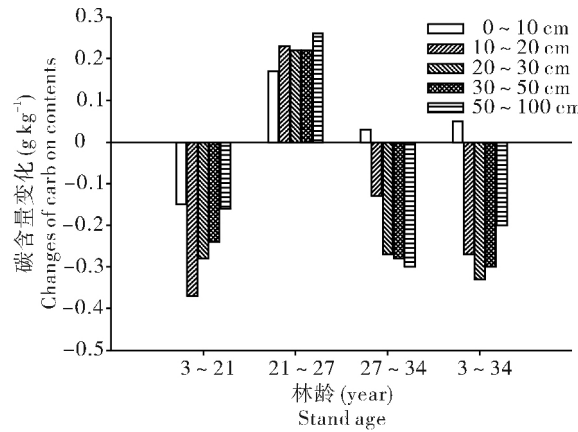


图 5 土壤氮含量的阶段性变化
Fig. 5 Changes of soil nitrogen contents

注 图中数据为不同品系的平均值 ± 标准差。
图 6 不同割龄橡胶林的年均干胶产量
Fig. 6 Mean annual yield of dry rubber (AYDR) varying with tapping years

表 4 干胶产量和林龄对土壤容重、碳含量与储量、氮含量与储量的影响

Table 4 Effects of annual yield of dry rubber (AYDR) and stand age on soil BD, SCC, SCS, SNC and SNS

项目 Items	干胶产量 AYDR		林龄 Stand Ages		R^2
	F values	P values	F values	P values	
容重 (BD)	2.752	0.111	11.628	< 0.001	0.72
碳含量 (SCC)	0.173	0.681	8.888	< 0.001	0.698
碳储量 (SCS)	0.006	0.939	4.473	0.005	0.540
氮含量 (SNC)	0.229	0.637	3.836	0.011	0.526
氮储量 (SNS)	0.801	0.380	6.599	0.001	0.599

3 结论与讨论

3 ~ 34 年林龄橡胶林 1 m 深土体的平均土壤碳储量为 148.62 t hm⁻² (图 2b), 与 de Blécourt et al.^[7]的研究结果基本一致 (139.43 t hm⁻²)。尽管从 3 年林龄到 34 年林龄橡胶林, 土壤碳总体上表现为消耗 (降低 21.23 t hm⁻²) (图 2b), 但存在一个由碳释放为主到碳固定为主的转变过程。由图 2 和图 3 可以看出, 碳的消耗主要发生在橡胶种植的早期阶段 (≤ 9 年林龄), 橡胶种植 9 年以后土壤碳储量逐渐恢复并达到一个相对稳定的状态。产生这样的结果主要有以下几个方面的原因: (1) 在橡胶林种植早期由于橡胶树的快速生长吸收和消耗更多的土壤养分, 具体表现为土壤碳氮含量均降低 (图 2a, 4a); (2) 橡胶林种植的早期阶段冠层较小, 其影响表现在三个方面: 首先, 林下地表大面积裸露, 土壤侵蚀与水土流失的风险较高; 其次, 影响土壤呼吸。Katsunori and Shoji^[30]曾指出, 植被冠层变大后可提高蒸腾作用、减少到达土壤层的太阳辐射, 从而降低土壤湿度和温度, 最终导致土壤呼吸降低。为此不难推断, 在橡胶林种植初期其冠层较小, 土壤呼吸相对较高; 最后, 冠层小相应的凋落物也较少, 土壤养分归还量相对较少 (本研究未发表数据); (3) 在橡胶林种植的早期阶段, 残留的植物残体的分解使土壤碳排放增加; (4) 整地等人类活动破坏了土壤的团粒结构, 使被土壤团粒保护的碳被释放出来, 并加速了土壤有机物质的分解。

综上所述, 在橡胶树种植早期阶段 (≤ 9 年林龄) 土壤碳的输出大于输入, 土壤碳储量持续降低。植胶 9 年以后, 一方面随着橡胶林的生长其冠层逐渐变大, 同时残留植物残体的分解也基本完成, 土壤呼吸逐渐降低; 另一方面, 由于凋落物的增加及因整地措施暴露在外的土层逐渐恢复其固碳能力^[8], 土壤碳的输入和固碳能力逐渐增加, 土壤碳逐渐恢复。因此, 在西双版纳的橡胶林中, 土壤极可能存在一个由碳源向碳汇转变的过程。Arevalo^[31]在加拿大的研究指出, 在白杨 (Hybrid

poplar) 种植的前 4 年里土壤以碳排放为主, 为碳源; 之后土壤固碳量增加, 由碳源转为碳汇。由于受树龄和其它因素的限制, 本研究尚不能准确地摸清橡胶林中土壤由碳源向碳汇转变的关键时期, 在今后开展的模型模拟分析将弥补这一缺陷, 这些研究对该区现有橡胶林有计划的更新具有重要意义。

3 ~ 34 年林龄橡胶林 1 m 深土体的土壤氮储量在 12.54 t hm⁻² ~ 16.47 t hm⁻² 之间 (图 4b)。从 3 ~ 34 年林龄橡胶林土壤氮储量分别降低 0.20 g kg⁻¹ 和 1.3 t hm⁻², 同样表现为消耗。然而, 土壤氮含量随时间的变化与土壤碳含量存在不同, 首先种植橡胶后土壤氮的降低从 3 年林龄持续到 21 年林龄, 时间比土壤碳的消耗长的多; 其次, 橡胶产量降低后土壤氮含量不增反减, 表现为 34 龄橡胶林的土壤氮含量比 27 龄低 0.19 g kg⁻¹。与土壤碳储量相比, 土壤氮储量随林龄的变化相对较复杂。这是因为土壤中的氮含量较低, 土壤容重细微的变化即可引起土壤氮储量的变化。因此, 有人提出用参照植被类型 (人工林建立前的植被类型) 的土壤容重代替人工林的土壤容重, 从而消除人类活动的影响^[31,32], 土壤容重的校正与否可造成土壤碳储量 -5% ~ 18% 错误估计^[7]。这是本文值得学习的地方, 但在景洪农场目前已经很难找到成片的天然林, 因此本研究中未能设置相对应的参考森林类型, 今后的工作中将尽量弥补或用西双版纳地区热带季节雨林的均值作为参考。

协方差分析显示, 干胶产量对土壤碳氮含量与储量没有显著影响 (表 3), 但在割胶早期 (7 ~ 9 年林龄), 土壤碳迅速降低 ($P < 0.01$) (图 2), 这表明割胶极有可能引起一些生理生态方面的变化, 从而影响橡胶林的土壤碳氮含量与储量, 但目前还没有相关的研究结果, 有待进一步研究。

在 1 m 深土壤剖面上, 表层 0 ~ 10 cm 土壤碳氮含量与储量随林龄的变化均与其它各层明显不同 (图 3 和图 5), 说明施肥等人类活动对表层 0 ~ 10 cm 的影响较大。若按 10 cm 每层计算, 土壤碳氮的变化以 30 cm 以上的土层最明显, 表明橡胶种植及随后的耕作与管理主要对 30 cm 以上土壤的碳氮含量与储量产生影响, 与以往的研究结果 20 ~ 40 cm 相符^[14,33]。

参考文献:

- [1] GUARDIOLA-CLARAMONTE M, TROCH P A, ZIEGLER A D, et al. Local hydrologic effects of introducing non-native vegetation in a tropical catchment[J]. Ecohydrology, 2008, 1: 13 - 22.
- [2] 李国华, 田耀华, 倪书邦, 等. 橡胶树生理生态学研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1146 - 1154.
- [3] ZIEGLER A D, FOX J M, XU J C. The Rubber Juggernaut[J].

- Science. 2009, 324(22): 1024 - 1025.
- [4] FOX J, VOGLER J B, SEN O L, et al. Simulating land-cover change in Montane Mainland Southeast Asia [J]. Environmental Management, 2012, 49: 968 - 979.
- [5] XU J C, GRUMBINE R E, BECKSCH?FER P. Landscape transformation through the use of ecological and socioeconomic indicators in Xishuangbanna, Southwest China, Mekong Region[J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 749 - 756.
- [6] LI H M, MA Y X, 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.
- [7] DE BLÉCOURT M, BRUMME R, XU J C, et al. Soil carbon stocks decrease following conversion of secondary forests to rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations [J]. PLOS ONE, 2013, 8 (7): e69357. doi:10.1371/journal.pone.0069357.
- [8] DE BLÉCOURT M, HÄNSEL VM, BRUMME R, et al. Soil redistribution by terracing alleviates soil organic carbon losses caused by forest conversion to rubber plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 313: 26 - 33.
- [9] SONG Q H, TAN Z H, ZHANG Y P, et al. Do the rubber plantations in tropical China act as large carbon sinks?[J]. iForest - Biogeosciences and Forestry, 2014, (7): 42 - 47.
- [10] 宋清海, 张一平. 西双版纳地区人工橡胶林生物量、固碳现状及潜力[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 1887 - 1891.
- [11] ZHANG H, ZHANG G L. Microbial biomass carbon and total organic carbon of soils as affected by rubber cultivation [J]. Pedosphere, 2003, 13(4): 353 - 357.
- [12] CHENG C M, WANG R S, JIANG J S. Variation of soil fertility and carbon sequestration by planting *Hevea brasiliensis* in Hainan Island, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19: 348 - 352.
- [13] LI H M, MA Y X, LIU W J, et al. Soil Changes Induced by Rubber and Tea Plantation Establishment: Comparison with Tropical Rain Forest Soil in Xishuangbanna, SW China [J]. Environmental Management, 2012, 50: 837 - 848.
- [14] YANG JC, HUANG J H, PAN Q M, et al. Long-term impacts of land-use change on dynamics of tropical soil carbon and nitrogen pools [J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16 (2): 256 - 261.
- [15] 方丽娜, 杨效东, 杜 杰. 土地利用方式对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 837 - 844.
- [16] 李明锐, 沙丽清. 西双版纳不同土地利用方式下土壤氮矿化作用研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 54 - 58.
- [17] ZHANG M, FU X H, FENG W T, et al. Soil organic carbon in pure rubber and tea-rubber plantations in South-western China[J]. Tropical ecology, 2007, 48(2): 201 - 207.
- [18] WAUTERS J B, COUDERT S, GRALLIEN E, et al. Carbon stock in rubber tree plantations in Western Ghana and Mato Grosso (Brazil) [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2347 - 2361.
- [19] MANDAL D, ISLAM K R. Soil carbon sequestration under rubber plantations in North-East India[A]. In: R. Lal et al. (eds.), Climate Change and Food Security in South Asia [C]. Springer Science Business Media B.V. 2011: 433 - 444.
- [20] LI H M, AIDE T M, MA Y X, et al. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China[J]. Biodiversity and Conservation, 2007, 16(6): 1731 - 1745.
- [21] Tan Z H, Zhang Y P, Song Q H, et al. Rubber plantations act as water pumps in tropical China [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38: L24406. DOI: 10.1029/2011GL050006.
- [22] 周文君, 张一平, 沙丽清, 等. 西双版纳人工橡胶林集水区径流特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):54 - 68.
- [23] 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.
- [24] LIU W J, LIU W Y, LU H J, et al. Runoff generation in small catchments under a native rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, southwestern China [J]. Water and Environment Journal, 2011, 25: 138 - 147.
- [25] LIU W J, LI J T, LU H J, et al. Vertical patterns of soil water acquisition by non-native rubber trees (*Hevea brasiliensis*) in Xishuangbanna, southwest China [J]. Ecohydrology, 2013, 7 (4): 1234 - 1244.
- [26] 刘鹏飞, 马友鑫, 郑 征, 等. 西双版纳地区典型森林类型土壤碳储量研究[J]. 云南大学学报, 2013, 35(S1): 102 - 107.
- [27] 中国科学院南京土壤研究所土. 中国土壤系统分类检索 (第 3 版) [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [28] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [29] GUO L B, GIFFORD R M. 2002. Soil carbon storage and land use change: a meta-analysis [J]. Global Change Biol. 8: 345 - 360.
- [30] KATSUNORI K, SHOJI S. Plant canopy effects on soil thermal and hydrological properties and soil respiration [J]. Ecological Modelling, 2006, 196: 32 - 44.
- [31] AREVALO C B M. Carbon Dynamics Associated with Different Land Uses in North Central Alberta [D]. Alberta: University of Alberta, 2010.
- [32] DAVIDSON E A, ACKERMAN I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. Biogeochemistry, 1993, 20: 161 - 193.
- [33] DETWILER R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils[J]. Biogeochemistry, 1986, 2: 67 - 93.

Impacts of Long-term Rubber Plantation on Soil Carbon and Nitrogen Sequestration in Xishuangbanna

SUN Yan-ci^{1,2}, MA You-xin^{1*}, CAO Kun-fang³, LI Hong-mei¹, HE Jian-fen⁴,
LIU Chang-ping⁴, LIU Hong-ping⁵, LI Bin⁵

(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 100094, China; 3. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, and College of Forestry, Guangxi University, Guangxi 530004, China; 4. The management committee of Xishuangbanna Mansha Farm, Jinghong 666100, China; 5. Forestry and water integrated service center, management committee of Jinghong Farm, Jinghong 666100, China)

Abstract: In order to enhance the development of sustainable rubber plantation, this study investigated the dynamics of soil carbon and nitrogen concentrations in the rubber plantation with different stand ages in Xishuangbanna, Southwest China. The results showed that soil carbon and carbon storage, soil nitrogen contents and nitrogen storage decreased over 34 years of rubber plantation. Approximately 3.33 g kg⁻¹ and 21.23 t hm⁻² carbon, 0.20 g kg⁻¹ and 1.3 t hm⁻² nitrogen were depleted, respectively. The depletion of soil carbon continued at the early stage of rubber planting till the stand age of 9 years, thereafter, soil carbon gradually increased and reached a relatively stable state in stands older than 21 years. Compare to soil carbon, soil nitrogen contents continuously reduced for a longer time (3 ~ 21-year stand). Soil nitrogen storage was sensitive to soil bulk density (BD), and its temporal change was irregular. As for the top 1 m soil profile, changes of soil carbon and nitrogen mainly occurred in the top 30 cm soil while soil depths were evenly divided by every 10 cm. Covariance analysis showed that annual dry rubber yield had no significant effect on soil carbon and nitrogen concentrations. However, soil carbon and nitrogen contents decreased obviously at the beginning of rubber tapping (9-year), indicating that rubber tapping might cause some physiological and ecological changes which in turn affect soil carbon and nitrogen sequestration in rubber plantation.

Key words: Rubber plantation; Soil carbon and nitrogen; Rubber tapping; Xishuangbanna

[责任编辑 张玉玲]