

· 热带作物 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240138



主持人: 张洪亮, 徐 冉

云南橡胶林土壤碳氮磷及生态化学计量比特征

臧庆辉^{1,2,3#}, 吴志祥^{1,2,3*}, 孙 瑞^{2,3}, 杨 川^{2,3}, 符庆茂^{2,3}

(1. 海南大学 生态学院, 海南海口 570228 中国; 2. 中国热带农业科学院 橡胶研究所, 海南海口 571101 中国; 3. 海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站, 海南 儋州 571737 中国)

摘 要: 为全面了解云南橡胶(*Hevea brasiliensis*)林土壤合理养分, 给橡胶林土壤生态恢复提供数据支持。以云南(景洪、河口、瑞丽)不同林龄橡胶林土壤为研究对象, 在不同林龄橡胶林中分别设 20 m×20 m 的典型样地, 按(0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm)分层取土样, 并测定各个林龄橡胶林土壤各层土样总碳(TC)、全氮(TN)、总磷(TP)含量并计算其化学计量比, 分析植胶区橡胶林土壤的空间分布特征及随林龄和土层的动态变化。结果表明, 各植胶区橡胶林土壤 TC、TN、TP 含量随着林龄和土层不断增加呈先增加后降低趋势, 其中, 瑞丽和景洪的不同林龄橡胶林土壤 TC、TN 和 TP 含量差异呈极显著特征, 河口的不同林龄橡胶林土壤含量差异呈不显著特征。景洪植胶区土壤 C:N 随土层的不断加深呈先增加后降低的趋势, 在 40~60 cm 达到最高值; 土壤 C:P 随土层的加深不断降低, 在表层(0~20 cm)达到最高值; N:P 随土层加深呈先降低后增加的趋势。瑞丽植胶区土壤 C:N 和 C:P 随土层加深呈先降低后增加的趋势, 在(40~60 cm)达到最高值; N:P 随土层加深呈现不断降低趋势。河口植胶区土壤 C:P 随土层加深呈现先降低而后增加趋势, C:P 和 N:P 随土层加深呈现一定的降低趋势。随着林龄的增长, 橡胶林土壤养分元素含量总体上呈增加再降低趋势, 植胶区不同林龄和不同土层橡胶林土壤 C、N、P 及生态化学计量比的差异均显著($P<0.05$), 不同区域植胶区土壤 C、N、P 在不同林龄之间的差异呈极显著($P<0.01$)。研究区成熟林龄橡胶林的生长和发育受到土壤 N 和 P 的限制, 建议在橡胶林速生阶段适当增施氮肥和磷肥。

关键词: 橡胶林; 土壤碳氮磷; 林龄; 化学计量比; 植胶区

中图分类号: S718

文献标志码: A

文章编号: 1674-7054(2025)04-0487-08

臧庆辉, 吴志祥, 孙瑞, 等. 云南橡胶林土壤碳氮磷及生态化学计量比特征 [J]. 热带生物学报, 2025, 16(4): 487-494. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240138

天然橡胶主要来源于巴西橡胶树(*Hevea brasiliensis*), 是中国乃至世界不可或缺的工业原料和国家战略物资之一, 全世界 90% 的橡胶产自水热条件较好的东南亚等地(泰国、印尼、马来西亚和越南)及少数非洲国家(科特迪瓦)^[1]。中国橡胶树种植区大多分布于南方地区, 此地土壤多偏酸性, 加上是热带多雨气候, 致使土壤中养分元素具有较强的空间变异性^[2]。土壤碳、氮、磷(C、N、P)是生态循环和土壤肥力研究的主要对象, 还是林间生物进行生命历程必需的物质, 其含量受多

种环境因子的影响, 包括气候和土壤等因素^[3]。研究和分析 C、N、P 生态化学计量特征可以反映营养元素在植胶区植株不同器官中的分配关系, 确定植胶区植株在不同环境中的养分限制因素, 预判橡胶林对生态环境系统变化的适应性^[4]。目前, 国内外学者从不同尺度研究了植物化学计量特征对生态环境、土壤管理、经营措施等的响应^[5-6]。研究表明, 植胶区植物对土壤营养元素的吸收和分配在不同器官的表现不一致, 受植胶区植株品种、年限、环境和管理措施等因素的影响下植物的

收稿日期: 2024-08-28

修回日期: 2024-12-27

基金项目: 国家天然橡胶产业技术体系建设岗位科学家经费项目“现代农业产业技术体系建设专项”(CARS-33-ZP3); 中国热带农业科学院基本科研业务费揭榜挂帅项目(1630022022003)

*第一作者: 臧庆辉(1993—), 男, 海南大学生态学院 2022 级硕士研究生。E-mail: 1586764531@qq.com

*通信作者: 吴志祥(1970—), 男, 研究员, 博士生导师。研究方向: 热带林业生态。E-mail: wzxrri@163.com

生态化学计量特征也表现出一定的差异性^[7-8]。

土壤 C : N : P 化学计量比是体现土壤肥力的主要特征,可以显示橡胶林植被之间的营养状况。土壤元素不仅影响了植胶区植被的生长和分布^[9-12],而且在不同林龄和土层区间具有高度异质性,土壤元素化学计量比受到土壤类型、植被群落特征、气候条件、植被发育阶段等因素的强烈影响^[13]。由此可见,C : N 和 C : P 比值反映了植胶区橡胶树生长速度,并与橡胶树对 N 和 P 的利用效率有关,N : P 比则是决定土壤生态群落结构和功能的关键性指标,并且可以作为对植胶区土壤生产力起限制性作用的营养元素的指示^[14-15]。通过对植胶区土壤进行元素含量营养诊断可以及早发现所亏缺的营养元素,从而及时补充所需的肥料,促进橡胶树的快速生长^[16]。因此,研究和分析 C、N、P 元素在植胶区土壤中的含量和分布格局十分必要^[17]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 研究区域位于中国云南省境内的景洪市、河口瑶族自治县、瑞丽市等地的植胶区;该区域地处赤道热带北缘向亚热带过渡地区,气候主要受印度洋及太平洋季风气候影响,属于中国西南亚热带季风气候,形成夏秋季多雨、冬春季干旱、年温差小、日温差大、干湿季节明显的气候特征。该地区年平均气温为 15.7~20.4℃,年均降雨量 1347.6~1750.5 mm。该地区的土壤特征以赤红壤和砖红壤为主,土壤含水量过高且是黏壤性质。季风常绿阔叶林是该地区森林植被特征,橡胶树属于季风常绿阔叶林植被类型之一。

1.2 样地设置 选取景洪、河口、瑞丽植胶区不同林龄(5、12、20、28 和 35 a)的橡胶林,为保持立地条件基本一致,样地的海拔范围控制在 10~280 m,坡度范围在 6~18°。在每个林龄的林分中设置 20 m×20 m 的 5 块重复样地进行取样,林地相互间隔大于 15 m。

1.3 土样采集 在不同林龄的橡胶林样地内按“S”形或者“5 点法”挖取 5 个土壤剖面,为防止边缘效应的影响,取样剖面距离样方边缘至少 15 m。分别按幼龄林和老龄林挖至 0~20、20~40、40~60 cm;中龄林龄和近熟林龄土层挖至 0~100 cm,并取约 1 kg 的土样装到试验自封袋中,同一样地

5 个剖面相同层次的土样混合均匀,取混合均匀的土壤 1 kg 风干,挑去石砾和植物残体,过 2 mm 土壤筛装入自封袋保存,土壤样品采集结束后带回实验室,先将取回的土壤进行晾干和去杂处理,风干研磨后过 0.2 mm 筛,开始实验备用。

1.4 样品测定 土壤中全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法(半微量凯式法)测定,全磷用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定,有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。

1.5 数据处理 数据处理运用 Microsoft Excel 2019 完成;橡胶林与热带作物土壤有机碳含量差异对比图制作运用 Origin 2021 完成;不同地区、林龄和土层之间的土壤总碳(Total Carbon, TC)、全氮(Total Nitrogen, TN)、总磷(Total Phosphorus, TP)含量差异显著性检验用 SPSS-Statistics V27.0 单因素方差分析(Duncan 法)完成。

2 结果与分析

2.1 不同区域的橡胶林土壤 C、N、P 含量特征

云南不同地理位置的 C、N、P 养分元素在植胶区不同林龄阶段的特征分布随林龄的增长呈现先增加而后降低(表 1)。通过对不同区域橡胶林土壤元素含量特征的分析,这三地植胶区林龄阶段土壤养分变化差异为:植胶区土壤 C、N、P 含量在成熟林(12、20 a)达到最高值,景洪植胶区土壤元素含量值在该林段(12、20 a)中 TC 含量值为 67.95 和 49.76 g·kg⁻¹;TN 含量值为 28.88 和 23.91 g·kg⁻¹;TP 含量值为 16.99 和 13.01 g·kg⁻¹。瑞丽植胶区土壤元素含量值在该林段中 TC 含量值为 21.22 和 25.96 g·kg⁻¹;TN 含量值为 12.37 和 15.53 g·kg⁻¹;TP 含量值为 9.16 和 10.29 g·kg⁻¹。河口植胶区土壤元素值在该林段中 TC 含量值为 21.72 和 29.33 g·kg⁻¹;TN 含量值为 8.77 和 8.89 g·kg⁻¹;TP 含量值 7.67 和 8.44 g·kg⁻¹。这三地植胶区土壤养分元素在幼龄林(0~7 a)阶段含量值较低,可能因素是在橡胶林生长发育阶段需要吸收较多的养分所导致。在三地植胶区内的土壤元素含量在不同土层垂直分布的特征显示,尤其是在浅层土壤元素含量值变化趋势更加明显,植胶区土壤 C、N、P 在 0~20 cm 土层中含量值相对较高;该土层中景洪植胶区不同林龄土壤 TC 含量为 4.42 g·kg⁻¹,土壤 TN 含量为 2.16 g·kg⁻¹,土壤 TP 含量为 1.07 g·kg⁻¹;

表 1 云南三地植胶区不同林龄橡胶林土壤养分元素含量

Tab. 1 Soil nutrient element contents in three areas of rubber plantation in Yunnan Province g·kg⁻¹

植胶区 Plantation	元素 Element	0 ~ 7 a	8 ~ 14 a	15 ~ 21 a	22 ~ 28 a	29 ~ 35 a
景洪 Jinghong	TC	24.29±2.01	67.95±6.75	49.76±3.24	28.95±2.83	23.7±3.89
	TN	14.26±0.96	28.88±0.87	23.91±0.53	16.25±0.57	13.50±0.26
	TP	3.98±0.16	16.99±0.84	13.00±0.97	12.86±0.64	7.88±0.37
瑞丽 Ruili	TC	21.89±3.87	21.22±1.90	25.96±3.86	16.68±2.80	23.28±2.30
	TN	10.03±1.24	12.37±0.53	15.53±0.75	9.76±0.84	12.64±1.38
	TP	6.38±0.28	9.16±0.86	10.29±0.67	6.12±0.89	11.98±0.86
河口 Hekou	TC	17.36±3.35	21.72±2.86	29.33±4.52	24.85±3.14	17.15±1.54
	TN	5.31±0.67	8.77±0.71	8.77±0.84	8.56±0.68	4.99±0.35
	TP	5.25±0.50	7.67±0.81	8.44±0.67	9.74±0.37	4.88±0.27

瑞丽植胶区不同林龄土壤 SOC 含量为 2.43 g·kg⁻¹, 土壤 TN 含量为 1.05 g·kg⁻¹, 土壤 TP 含量为 0.96 g·kg⁻¹; 河口植胶区不同林龄土壤 TC 含量为 2.42 g·kg⁻¹, 土壤 TN 含量为 0.82 g·kg⁻¹, 土壤 TP 含量为 0.76 g·kg⁻¹. 三地植胶区土壤 C、N、P 含量值随着林龄和土层的变化而变化, 在幼龄林和成熟林时期, 三地橡胶林土壤 C、N、P 含量在林龄的增长而呈现增加的趋势, 三地植胶区在不同土层中随着土层的不断加深土壤元素值而不断降低。

2.2 不同土层橡胶林土壤的 C、N、P 含量特征

云南三地植胶区不同林龄在不同土层阶段的橡胶林土壤中 TC、TN、TP 的含量随着土层加深(0~100 cm)也存在不一致的变化趋势(表 2)。此外, 在表层(0~20 cm)区间内不同林龄橡胶林土壤含量值有不同的差异性, 而且 5 个林龄橡胶林在景洪、瑞丽和河口植胶区土壤 TC 含量区间分别为 2.76~5.26、1.37~2.74 和 1.25~2.78 g·kg⁻¹; 在表层(0~20 cm)区间内 5 个林龄橡胶林在景洪、瑞丽和河口植胶区土壤 TN 含量区间分别为 1.06~2.43、0.45~1.24 和 0.34~1.04 g·kg⁻¹; 在表

表 2 云南三地植胶区不同土层橡胶林土壤含量及化学计量比

Tab. 2 Content and stoichiometric ratio of C, N, P in different soil layers in rubber plantations of three areas in yunnan Province

植胶区 Plantation	土层/cm Soil layer/cm	TC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P
景洪 Jinghong	0 ~ 20	4.42±0.83 ^a	2.16±0.27 ^a	1.07±0.18 ^a	1.94±0.39 ^a	4.33±1.73 ^a	2.30±1.14 ^a
	2 ~ 40	1.89±0.87 ^b	0.92±0.28 ^{ab}	0.51±0.15 ^a	2.01±0.59 ^a	3.9±1.84 ^a	2.04±1.10 ^{ab}
	40 ~ 60	1.58±0.68 ^b	0.80±0.26 ^b	0.57±0.19 ^a	2.08±0.26 ^a	3.14±1.06 ^{ab}	1.51±1.14 ^{ab}
	60 ~ 100	1.35±0.74 ^b	1.26±0.53 ^b	0.58±0.11 ^a	1.84±0.94 ^b	2.35±0.94 ^b	1.25±0.26 ^a
瑞丽 Ruili	0 ~ 20	2.43±0.41 ^a	1.05±0.19 ^b	0.96±0.20 ^a	1.83±0.39 ^a	2.77±0.89 ^a	1.54±0.58 ^a
	20 ~ 40	1.01±0.35 ^{ab}	0.55±0.14 ^{ab}	0.45±0.18 ^a	1.84±0.41 ^a	2.54±1.15 ^a	1.35±0.91 ^a
	40 ~ 60	1.42±0.22 ^b	0.45±0.13 ^b	0.35±0.91 ^a	1.80±0.36 ^a	2.81±0.60 ^a	1.55±0.45 ^a
	60 ~ 100	0.82±0.23 ^b	0.47±0.14 ^b	0.32±0.10 ^a	1.68±0.31 ^a	2.36±0.56 ^a	1.41±0.37 ^a
河口 Hekou	0 ~ 20	2.42±0.35 ^a	0.82±0.12 ^a	0.76±0.10 ^a	3.98±6.02 ^a	3.36±1.14 ^a	1.10±0.49 ^a
	20 ~ 40	1.02±0.34 ^{ab}	0.32±0.90 ^{ab}	0.33±0.06 ^{ab}	3.27±1.03 ^a	3.14±1.22 ^a	0.98±0.33 ^a
	40 ~ 60	0.98±0.32 ^b	0.34±0.95 ^{ab}	0.32±0.07 ^{ab}	2.93±0.69 ^a	2.89±0.80 ^a	1.01±0.27 ^a
	60 ~ 100	0.89±0.24 ^b	0.28±0.83 ^a	0.30±0.06 ^b	3.27±1.27 ^a	3.02±0.91 ^a	0.97±0.24 ^a

注: 同行中不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same line indicate significant differences($P<0.05$).

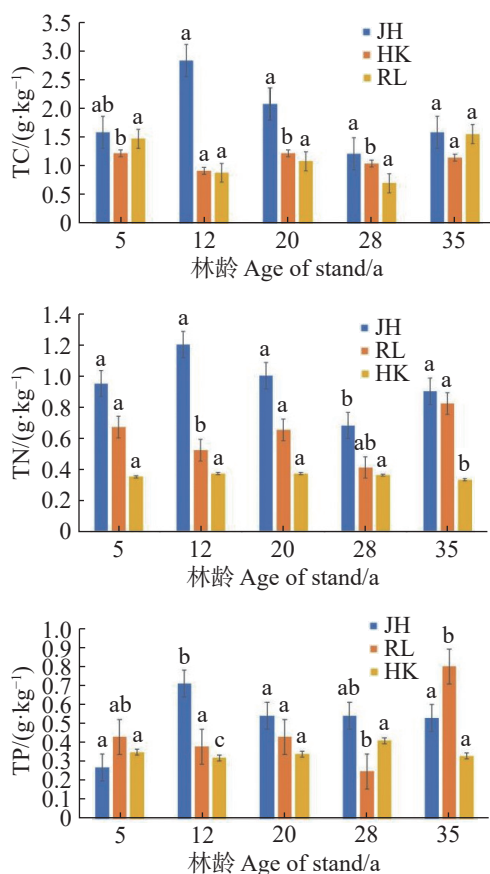
层(0~20 cm)区间内 5 个林龄橡胶林在景洪、瑞丽和河口植胶区土壤 TP 含量区间分别为 0.51~1.25、0.35~1.16 和 0.32~0.86 g·kg⁻¹。通过对景洪、瑞丽和河口植胶区土壤含量区间值在浅层垂直区域内的比较(图 1), TC、TN 和 TP 的含量随土层的不断加深土壤养分含量不断减少, 深层土壤 TC 含量区间分别在 0.61~2.26、0.59~1.64 和 0.65~1.30 g·kg⁻¹。总的来说, 橡胶林土壤养分元素含量均表现出表层高于深层的特点, 在表层(0~20 cm)土壤元素含量值的对比显示, 景洪植胶区的土壤 TC 含量值明显高于瑞丽和河口植胶区, 土壤 TN 含量值景洪也高于瑞丽和河口植胶区, 土壤 TP 含量值景洪和瑞丽植胶区大致一样, 河口植

胶区相对较低。

2.3 不同林龄橡胶林土壤 C、N、P 含量特征

从景洪、瑞丽、河口等地不同林龄胶园土壤 TC、TN、TP 含量的平均值来看(表 1), 0~7、8~14 和 15~21 a 3 个龄级橡胶林土壤 TC、TN 和 TP 含量显著高于 22~28 和 29~35 a 这 2 个龄级。其中, 在 8~14 a 林龄植胶区内, 景洪橡胶林土壤 TC、TN 和 TP 含量最高; 在 15~21 a 林龄植胶区内瑞丽和河口这 2 个地方橡胶林土壤 TC、TN 和 TP 相对较高; 在 29~35 a 林龄植胶区内这三地的林段橡胶林土壤 TC、TN 和 TP 含量最低, 各阶段的林龄橡胶林土壤有机碳含量由高到低顺序为 8~14 a>0~7 a>16~21 a>29~35 a>22~28 a。如果单从元素含量在不同林龄中植胶区分析来看(图 1), 景洪土壤 TC 含量值显著高于瑞丽、河口植胶区, 景洪土壤 TC 含量以植胶区不同林龄 12 和 20 a 最为丰富, 瑞丽土壤 TC 含量以植胶区不同林龄 5 和 35 a 最为丰富, 河口土壤 TC 含量在不同林龄植胶区变化较为均匀。从 5 个林龄橡胶林分析云南三地橡胶林土壤养分含量值的区域变化趋势是不同的, 不同林龄植胶区土壤元素含量值的变化分布如下: 景洪土壤 TN 含量显著高于瑞丽、河口植胶区, 其总体趋势是景洪>瑞丽>河口, 景洪土壤 TN 含量以植胶区不同林龄在 12 和 20 a 最为丰富, 瑞丽土壤 TN 含量在植胶区不同林龄在 5 和 35 a 最为丰富, 河口土壤 TN 含量在植胶区不同林龄变化趋势相对均匀。景洪土壤 TP 含量以植胶区不同林龄在 12、20 和 28 a 最为丰富, 瑞丽土壤中 TP 含量以植胶区不同林龄中 5、20 和 35 a 最为丰富, 河口土壤 TP 含量在植胶区 28 a 较为丰富。本研究表明: 从不同橡胶林土壤元素含量值在植胶区的变化可以看出, 土壤 TC 含量值主要体现在 12 和 20 a, 在 28 a 相对较低; 土壤 TN 和 TP 在植胶区不同林龄 12 和 28 a 的含量相对较低, 可见, 不同林龄橡胶林阶段土壤中 P 的含量表现出较大的差异。

云南省三地植胶区不同林龄相关性分析结果(图 2)表明: 景洪 12、20 a 两个林龄土壤 TC 含量均显著高于 5、28、35 a 这 3 个林龄, 5、12、和 20 a 三个林龄土壤 TN 含量均显著高于 28 和 35 a 这 2 个林龄, 12 a 林龄土壤 TP 显著高于其他 4 个林龄阶段。瑞丽 5 和 35 a 林龄土壤 TC 含量显著高



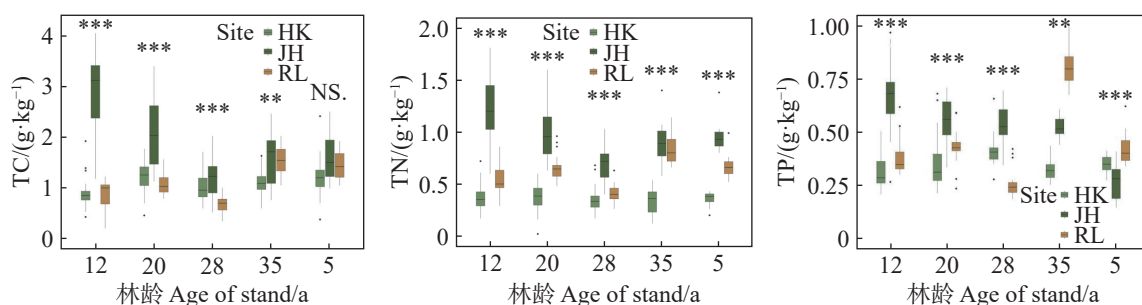
误差棒表示生物学重复之间的标准差, 同行中不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。JK 代表景洪, RL 代表瑞丽, HK 代表河口。下同。

The error bar represents the standard deviation between biological replicates. Different lowercase letters in the same row indicate significant differences ($P<0.05$). JK stands for Jinghong, RL for Ruili and HK for Hekou. similarly hereinafter.

图 1 云南三地橡胶林不同林龄土壤 C、N、P 变化趋势特征
Fig. 1 Variation trend of TC, TN and TP in the rubber plantations of three areas in Yunnan Province

于 12、20 和 28 a 三个林龄阶段, 这 5、12 和 20 a 三个林龄土壤 TN 含量显著高于 28 和 35 a 两个林龄阶段, 35 a 林龄土壤 TP 含量显著高于其他

4 个林龄阶段。河口植胶区的不同林龄土壤 TN 含量保持相对均匀变化趋势一致, 5 和 28 a 相对高于 12、20 和 35 a 三个林龄阶段。



“***”代表极显著性相关($P < 0.01$), “**”代表显著性相关($P < 0.05$), “NS.”代表不显著相关($P > 0.05$)。下同。

“***” represents a highly significant correlation ($P < 0.01$); “**” a significant correlation ($P < 0.05$); “NS.” a non-significant correlation ($P > 0.05$), similarly hereinafter.

图2 云南省三地植胶区不同林龄相关显著性差异分析

Fig. 2 Analysis of correlation significance of different ages of rubber plantations in three areas of Yunnan Province

2.4 土壤 C、N、P 化学计量特征及相关关系

橡胶林土壤 C、N、P 含量及化学计量比在景洪、瑞丽和河口植胶区分布特征表明(图3), 三地植胶区土壤养分元素在不同林龄阶段和不同土层之间对土壤 C、N、P 含量及化学计量比均具有一定的差异显著相关关系($P < 0.05$)除土壤 TP 外, 三地植胶区不同林龄与不同土层的交互作用对土壤 TC、

TN、TP 含量及化学计量比均具有极显著影响。对三地植胶区同一土层、不同林龄阶段的 TC、TN、TP 含量进行相关性检验, 结果发现, 不同林龄 20、28 和 35 a 的各层土壤元素均存在极显著性差异($P < 0.01$), 但 28 和 35 a 各层土壤 N 含量差异并不显著($P > 0.05$), 说明老龄林 28 和 35 a 阶段, 土壤中 N 的输入和输出趋于平衡, 增加趋势变缓。

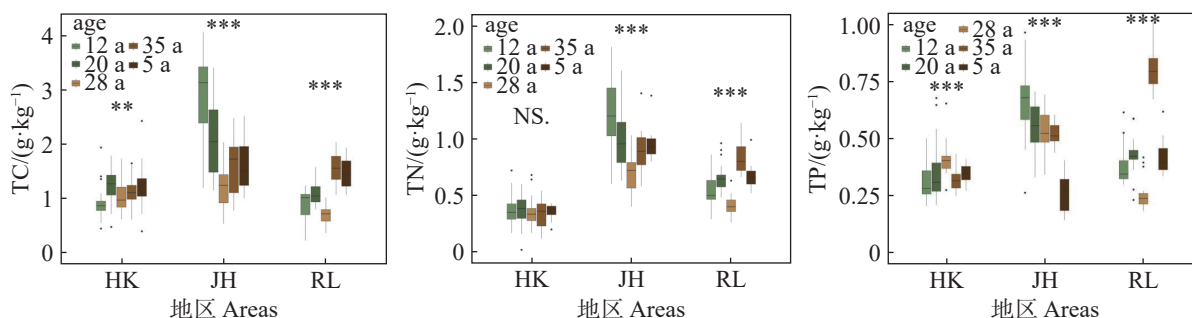


图3 云南省三地植胶区不同地区相关显著性差异分析

Fig. 3 Analysis of correlation significance of different areas of rubber plantation in Yunnan Province

3 讨论

3.1 林龄变化对土壤 C、N、P 含量及化学计量比特征的影响 有研究表明, 林龄通过改变林分结构格局对林下土壤养分元素产生显著影响^[18-19]。说明不同林龄对土壤 C、N、P 元素含量均值变化趋势有相应的影响, 随着胶林林龄的增长, 土壤养分元素含量变化相对较大, 橡胶林 C、N 含量值是随着林龄增长呈逐渐上升趋势, 而 P 含量值变化趋势相对一致, 这与姚卫举等^[18]的研究结果相近。由此看来, 不同林龄橡胶林土壤养分元素含量整体表

现出龄级越小土壤养分含量越高, 林龄越大, 老龄化现象加重, 土壤养分元素含量相对较低的特点, 而各植胶区不同林龄橡胶树对土壤 C : N、C : P、N : P 的影响差异不显著, 这与前人研究的结论基本一致^[20-21]。

3.2 土层差异对土壤 C、N、P 含量及化学计量比特征的影响 随着植胶区不同林龄阶段各土层(0 ~ 100 cm)不断变化 C : N、C : P、N : P 也呈现不同的变化规律, 该研究中, 土壤 C : N 和 C : P 与土壤有机碳含量关系密切, N : P 与土壤氮含量关系密切, 这与以往研究结果一致^[22-23]。通过对

植胶区各土层养分元素化学计量特征的研究显示,景洪植胶区土壤 C:N 随土层(40~60 cm)的不断加深呈现先升高后降低的趋势,在表层(0~20 cm)达到最高值,N:P 随土层(0~60 cm)加深呈现先降低后增加的趋势;土壤 C:P 和 N:P 则呈先降低后增加的趋势,瑞丽植胶区土壤 C:N 和 C:P 随土层加深呈现先降低后增加的趋势,在(40~60 cm)达到最高值,N:P 随土层加深呈现不断降低趋势变化;河口植胶区土壤 C:P 随土层加深呈现先降低而后增加趋势,C:P 和 N:P 随土层加深呈现一定的降低趋势。土壤 C、N、P 含量及其化学计量比随土层深度增加而降低,该结论与杨春霞等^[21]和徐晨瀛等^[24]的研究结果一致。不同林龄养分元素在深层土壤中(60~100 cm)呈现显著下降趋势,不同林龄阶段土壤 C:N、C:P、N:P 在土壤的土层垂直分布上显著不同,不同土层深度对植胶区土壤 C:N、C:P 和 N:P 均具有差异显著性影响($P<0.05$)。表明植胶区土壤表层(0~20 cm)TC、TN 含量较为丰富,而 TP 含量相对较为匮乏^[20]。云南三地植胶区不同土层土壤 C、N、P 养分元素在垂直分布上的空间异质性较高,随土壤深度增加显著减少^[21]。

3.3 不同区域对橡胶林土壤 C、N、P 化学计量特征的影响

不同植胶区可以揭示不同林龄橡胶林土壤元素 C、N、P 化学计量特征对土壤生态化学计量比变化的响应,有助于对橡胶林土壤养分转化与循环以及养分限制状况的掌握^[25-27]。通过对比分析发现,植胶区土壤 C:N 在不同区域林龄间的变化差异较小,验证了 Tischer 等^[23]与 Cleveland 等^[24]的研究结果,橡胶林不同林龄阶段土壤 C:N 在这 3 个区域之间具有相对的稳定性。土壤 C:P 可以反映不同区域土壤养分元素质量,C:P 值越低,这就说明植胶区土壤中的养分元素转化有机质中的有效磷含量越高^[25, 27-29]。前人对土壤生态化学计量比指示作用的研究结果表明,土壤 N:P 可作为土壤生态系统的养分限制指标^[16, 24, 30]。本研究对三地植胶区进行相关性研究分析显示,土壤 TP 含量及土壤 TC 含量均在瑞丽、景洪橡胶林土壤群落中呈极显著特征分布,土壤 TN 在河口橡胶林土壤中呈不显著特征分布,而通过在三地植胶区的橡胶林林龄显著性特征分析,土壤 TC 含量在 5 a 橡胶林呈不显著特征分布,

土壤 TN、TP 在不同林龄橡胶林均呈显著特征分布。随着林龄的增长,不同区域植胶区内的橡胶林土壤养分元素含量总体呈增加趋势,土壤 C、N、P 生态化学计量比在不同林龄(12、20、28 a)之间的差异性均呈现极显著特征分布。

本研究仅对不同林龄、不同区域和不同土层植胶区土壤养分变化和化学计量特征进行了初步探讨,要全面评价云南橡胶林生态系统土壤养分状况,还需要结合树叶、树干和根系等器官及枯落物中 C、N、P 化学计量关系开展进一步研究。还可以将橡胶林生态系统与土壤环境因子作为一个整体进行结合研究,以期更加深入了解植胶区生态系统固碳能力和养分平衡效应,可以更好地揭示森林植被—枯落物—土壤间的化学计量特征及其相互关系和空间变异。

4 结 论

本研究综合探讨了云南不同区域、不同林龄橡胶林土壤 C、N、P 与化学计量特征,并分析了土壤 C、N、P 化学计量特征的相关关系。结果表明,土壤 C、N、P 含量和化学计量在不同林龄和土层中均存在显著性差异,其中,从不同林龄分析,土壤 C、N、P 含量随林龄的增长呈先上升后下降的趋势;从不同土层分析,土壤 C、N、P 含量呈先降低后增加趋势,土壤 C:N、C:P、N:P 总体上呈先降低后增加趋势。通过显著性差异分析来看,土壤 TP 含量及土壤 TC 含量均在瑞丽、景洪橡胶林土壤群落中呈极显著特征分布($P<0.01$),土壤 TN 在河口橡胶林土壤中呈不显著特征分布,而土壤 TC 含量在 5 a 橡胶林呈不显著特征分布,土壤 TN、TP 在不同林龄橡胶林均呈显著特征分布($P<0.05$)。综上所述,根据土壤 C、N、P 化学计量比值显示,橡胶林的生长主要受到 N 和 P 的影响限制,橡胶林对于环境的适应性表现出相对较高的植物稳定性,因此,在橡胶林生长发育阶段,尤其要注意 N:P 的养分平衡,建议在抚育管理过程中合理施肥以改善土壤养分状况和植物养分利用效率。

参考文献:

- [1] 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): 532-539.

- [2] 冼伟光, 周丽, 唐洪辉, 等. 不同林龄针阔混交林土壤生态化学计量特征[J]. *广东林业科技*, 2015, 31(1): 1–6.
- [3] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10–21.
- [4] 盘金文, 郭其强, 孙学广, 等. 不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(4): 746–756.
- [5] 张寅方, 王秀荣, 申俊杰, 等. 苔藓对喀斯特城市林下土壤生态化学计量特征的影响[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(9): 2711–2720.
- [6] REN W, BANGER K, TAO B, et al. Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901–2010: roles of climate, atmospheric chemistry, land use and management[J]. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(1): 59–69.
- [7] ELSER J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135–1142.
- [8] 李鹏, 零天旺, 杨章旗, 等. 不同林龄马尾松人工林叶片-土壤碳氮磷生态化学计量特征研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2023, 43(1): 88–98.
- [9] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151–163.
- [10] 靖磊, 周延, 吕偲, 等. 洞庭湖湿地3个林龄杨树人工林叶与土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6530–6538.
- [11] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139–151.
- [12] 陈永川, 许木果, 黎小清, 等. 西双版纳橡胶林土壤磷的分布及与橡胶生长的关系[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(4): 64–69.
- [13] 方培, 胡海波, 王霞, 等. 不同林龄麻栎人工林土壤生态化学计量特征研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2022, 42(2): 39–47.
- [14] CHEN S P, WANG W T, XU W T, et al. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4027–4032.
- [15] ZHANG Z X, HAO M, LI Y Q, et al. Effects of vegetation and terrain changes on spatial heterogeneity of soil C-N-P in the coastal zone protected forests at northern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115472.
- [16] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 160–170.
- [17] 王连晓, 史正涛, 刘新有, 等. 西双版纳橡胶林土壤有机碳分布特征研究[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(7): 1200–1205.
- [18] 姚卫举, 牟晓杰, 万斯昂, 等. 不同土地利用方式土壤碳、氮、磷、硫含量及其生态化学计量特征[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(17): 231–239.
- [19] 邱新彩, 彭道黎, 李伟丽, 等. 北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(2): 221–229.
- [20] 张继辉, 蔡道雄, 卢立华, 等. 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5718–5728.
- [21] 杨春霞, 丁华平, 许木果, 等. 云南山地橡胶树的养分空间变化特征[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(10): 1933–1939.
- [22] 淑敏, 王东丽, 王凯, 等. 不同林龄樟子松人工林针叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 174–179.
- [23] TISCHER A, POTTHAST K, HAMER U. Land-use and soil depth affect resource and microbial stoichiometry in a tropical mountain rainforest region of southern Ecuador[J]. *Oecologia*, 2014, 175(1): 375–393.
- [24] 徐晨瀛, 胡启武, 邹素珍, 等. 鄱阳湖湿地剖面土壤碳氮磷化学计量比沿高程梯度的变化特征[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(11): 2514–2525.
- [25] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N : P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass?[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235–252.
- [26] 蒲洁, 齐雁冰, 王茵茵, 等. 农牧交错带不同植被群落对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4): 279–285.
- [27] 王慧, 郭月峰, 姚云峰, 等. 不同土地利用方式下土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(5): 995–1000.
- [28] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. *林业科学*, 2015, 51(7): 1–8.
- [29] 徐聪, 王策, 李明月, 等. 安新县不同利用方式土壤碳氮磷及生态化学计量特征研究[J]. *林业与生态科学*, 2020, 35(3): 304–313.
- [30] 郑冰倩, 曹瑞, 王壮, 等. 亚高山岷江冷杉林粗木质残体对土壤碳氮磷化学计量比的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(11): 2975–2982.

Contents of soil carbon, nitrogen and phosphorus and characteristics of their ecological stoichiometric ratios in Yunnan rubber plantations

ZANG Qinghui^{1,2,3#}, WU Zhixiang^{1,2,3*}, SUN Rui^{2,3}, YANG Chuan^{2,3}, FU Qingmao^{2,3}

(1. College of Ecology, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Danzhou National Field Observation and Research Station of Tropical Agricultural Ecosystem, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: In order to fully understand the reasonable nutrients of Yunnan rubber (*Hevea brasiliensis*) forest, soil ecological restoration of rubber forest provides data support. Using the soil of Yunnan (Jinghong, Hekou, Ruili), the typical samples of 20 m 20 m in different rubber forests, the soil samples were stratified (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 cm), and the spatial distribution characteristics of the soil of the rubber forest soil with the forest age and the dynamic changes were analyzed. The result show that the soil TC, TN, and TP contents in the rubber plantations generally increased and then decreased with the plantation age and soil depth. Significant differences were observed in the soil TC, TN, and TP contents among different ages of rubber plantations in Ruili and Jinghong, while the differences in Hekou were not significant. In Jinghong, the soil C : N ratio increased and then decreased with soil depth, reaching its highest value at (40–60 cm). The soil C : P ratio decreased with increasing soil depth, peaking at the surface layer (0–20 cm). The N : P ratio initially decreased and then increased with soil depth. The C : P and N : P ratios showed a trend of decreasing and then increasing, with the highest values at 40–60 cm. In Ruili, the C : N and C : P ratios decreased and then increased with soil depth, also peaking at 40–60 cm, while the N : P ratio continuously decreased. In Hekou, the C : P ratio decreased and then increased with soil depth, while both C : P and N : P ratios showed a general decreasing trend. The contents of soil nutrients (C, N, P) and their ecological stoichiometric ratios in rubber plantations generally increased and then decreased with plantation age. Significant differences were found in the soil C, N, P contents and their stoichiometric ratios among different ages and soil layers in the rubber plantations ($P < 0.05$), with highly significant differences observed between areas ($P < 0.01$). It is suggested that during the rapid growth stage of rubber plantations, appropriate application of nitrogen and phosphorus fertilizers should be considered, as the soil N and P affect the growth of mature rubber plantations.

Keywords: rubber tree; soil C, N and P; age of stand; stoichiometric ratio; rubber plantation

(责任编辑: 潘学峰)