



主持人:徐冉,张洪亮

有机肥替代化学氮肥的不同比例对海南橡胶林土壤养分和酶活性的影响

陆问^{1,2}, 徐文娟³, 苏天燕^{1,2}, 于磊^{1,2}, 蒋亚敏^{1,2}, 鲁静丽^{1,2},
刘文杰^{1,2}, 杨秋^{1,2}

(1. 海南大学 生态与环境学院, 海口 570228; 2. 海南省农林环境过程与生态调控重点实验室, 海口 570228; 3. 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海口 571101)

摘要: 开展不同比例有机肥替代化学氮肥对橡胶林土壤养分和酶活性的影响研究, 对有机肥替代化学氮肥的合理替代比例选择和天然橡胶产业的可持续发展具有重要意义。选取海南省白沙黎族自治县珠碧江农场橡胶林为研究对象, 利用等量施氮的原则从2022年6月设置6组不同处理: 不施肥处理(CK)、常规施肥处理(NPK)、有机肥替代25%化学氮肥处理(25%M)、有机肥替代50%化学氮肥处理(50%M)、有机肥替代75%化学氮肥处理(75%M)、有机肥替代100%化学氮肥处理(100%M)。施肥4个月后采集不同处理0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm和40~60 cm的土壤样品, 分析了土壤养分和酶活性特征。结果表明: 1) 相比NPK处理, 25%M处理显著提高0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层土壤有机碳(SOC)含量; 75%M处理均显著提高0~10 cm和10~20 cm土层土壤全氮(TN)含量; 75%M、100%M处理显著提高0~10 cm土层土壤硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)含量; 25%M处理显著提高0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)含量; 100%M处理显著提高0~10 cm和10~20 cm土层土壤速效磷(AvP)含量。2) 相比于CK处理, 75%M处理显著提高10~20 cm和40~60 cm土层土壤C(β -1, 4-葡萄糖苷酶, BG)、N(L-亮氨酸氨基肽酶, LAP; β -1, 4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶, LAP)、P(酸性磷酸酶, AP)循环酶活性。3) 随机森林模型结果表明, 影响C、N、P循环酶活性的主要因子有pH、SOC、土壤含水量(SWC)、TN、AvP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。4) 与NPK处理相比, 50%M、75%M和100%M处理橡胶单株累积产量分别提高11.9%、16.4%和11.8%。综上所述, 75%的有机肥替代比例能提高土壤TN含量和土壤C、N、P循环相关酶活性, 从而改善橡胶林土壤环境, 也能更好地提高橡胶单株产量, 有利于促进橡胶生产的可持续发展。

关键词: 橡胶林; 有机肥替代; 土壤酶活性; 土壤酶生态化学计量; 土壤养分

中图分类号: S154.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-7054(2024)06-0745-11

陆问, 徐文娟, 苏天燕, 等. 有机肥替代化学氮肥的不同比例对海南橡胶林土壤养分和酶活性的影响[J]. 热带生物学报, 2024, 15(6): 745-755. doi:10.15886/j.cnki.rdswwb.20240007

天然橡胶(*Hevea brasiliensis* Muell.Arg.)是国家重要的战略资源。海南岛是我国天然橡胶主产区之一。2021年, 海南岛橡胶种植面积512 600 hm^2 占全国植胶总面积45.7%, 产量36.9万t占全国产胶比重43.5%, 产值为41.4亿元; 海南天然橡胶种植遍布海南岛的18个市县, 从业人员79.3万人, 涉

胶家庭44万户, 覆盖人口199.7万人^[1], 因此, 发展好天然橡胶产业, 对于保障国家工业原料供应和战略物资储备、确保国防和经济安全, 促进植胶地区实现产业兴旺和乡村振兴等具有重要意义。然而, 天然橡胶产业是一种典型的资源环境约束型产业, 橡胶产量增加对施肥的依赖程度高^[2]。长期

收稿日期: 2024-01-11

修回日期: 2024-03-08

基金项目: 海南省重点研发计划(ZDYF2022XDNY181), 国家自然科学基金地区基金(42367034)

第一作者: 陆问(1999-), 女, 海南大学生态与环境学院2021级生态学硕士研究生。E-mail: luwen990205@163.com

通信作者: 杨秋(1981-), 女, 博士研究生, 副教授。研究方向: 生态系统生态学。E-mail: yq@hainanu.edu.cn

的化学肥料过量施加及肥料利用效率低会导致土壤严重酸化、有机质含量降低和养分供应不平衡等生态环境问题,已成为制约天然橡胶增产增效和胶园可持续发展的主要原因^[3]。因此,有必要从橡胶林土壤养分来源和损失途径入手,进行胶园平衡施肥技术研究。有机肥替代部分化学氮肥被证明是一种合理的农业施肥实践^[4-5],近年来在橡胶产业中被广泛应用。与传统的单施化学氮肥相比,有机肥替代部分化学氮肥可以增加土壤有机碳(SOC)含量,提高土壤氮(N)、磷(P)和钾(K)的供应^[6-8]。李佳乐^[9]对不同比例有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗生长指标影响的研究中发现,75%和100%有机肥替代对橡胶幼苗生长状况的改善效果最佳。李更新等^[10]发现,施用有机肥对土壤pH影响不大,但在一定程度上能增加土壤全氮(TN)和速效磷(AvP)含量。因此,寻求适宜比例的有机替代比例对提升橡胶园土壤养分条件十分必要,也是评价橡胶园减肥增效和橡胶可持续发展的关键环节。

土壤酶是土壤生态系统的重要组成部分,参与土壤中的众多生物地球化学过程,对土壤养分循环与转化、有机质的分解与固存都有着重要的意义^[11-13]。土壤酶化学计量可表征微生物的养分需求情况^[14],全球尺度上,土壤酶化学计量比约为C:N:P=1:1:1,由于气候环境海拔等因素,不同区域的酶化学计量比值会有所偏离,而偏离程度越大说明该地区受该养分需求越大^[15]。有研究结果表明,长期施用化肥或有机肥会显著提高土壤胞外酶活性^[16],不同种类的土壤酶对有机肥替代化肥的响应不同,当有机肥替代化肥比例达10%~30%时,土壤的磷酸酶和过氧化氢酶活性增加^[17]。当有机肥替代75%化肥氮时不仅可以提高土壤酶活性,而且还能有效减少土壤硝态氮的残留量^[18]。橡胶园的土壤环境质量与土壤胞外酶活性息息相关,但在等氮替换的原则下,不同比例有机肥替代化学氮肥对橡胶林下土壤理化性质、酶活性及土层之间的响应特征目前尚不完全清楚。基于此,本研究以海南省白沙黎族自治县珠碧江农场橡胶林为研究对象,分析有机肥替代化学氮肥的不同比例对橡胶林土壤养分和胞外酶活性的影响,期为有机肥替代化学氮肥的应用推广和橡胶增产增效提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 研究区位于海南岛白沙县龙江农场珠碧江农场3队(19°23'13.83"N, 109°17'35.82"E,海拔114 m)。该研究区地势平坦、土地肥沃、雨水充沛,为热带海洋性气候地区,年平均气温23.4℃,平均湿度82%,常年风速1.3 m·s⁻¹,多为东北风,年平均降雨量1 966.3 mm;区域以花岗岩和砂页岩发育的砖红壤为主,土壤多含砂砾。研究区橡胶园为2004年定植、2011年开割的橡胶园,种植品种为PR107品系,株行距为3.0 m×7.0 m。目前施肥方式为施有机肥(牛粪)、橡胶专用肥(复混肥)和尿素配施^[19]。

1.2 实验设计 于2022年6月—10月在研究区的试验样地内选取长势相对一致、排胶正常的橡胶树作为标准样树,以牛粪(鲜粪的含水量为67%,总有机碳、全氮、全磷和全钾的含量分别为70、5.76、0.29、0.27 g·kg⁻¹)作为替代的有机肥。根据农场的施肥标准,每株橡胶树全年施肥量为有机肥20 kg,全年施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=14:7:9)2 kg·株,相当于单质肥料为609 g尿素(N含量46%),1 166 g过磷酸钙(P₂O₅含量为12%),300 g氯化钾(K₂O含量为60%)。其中有机肥于年前一次性施入,化学氮肥按照5:3:2的比例分别于3月、6月和9月进行3次施肥。试验基于等氮的原则共设置了6个不同处理(表1):①不施肥处理(CK),②常规施肥处理(NPK),③有机肥替代25%化学氮肥处理(25%M),④有机肥替代50%化学氮肥处理(50%M),⑤有机肥替代75%化学氮肥处理(75%M),⑥有机肥替代100%化学氮肥处理(100%M)。实验为随机区组设计,每组选择分布集中、长势相对一致的20株橡胶树,每个处理3组重复。每次施肥尽量选择在降雨后土壤充分潮湿时,将肥料均匀地撒在施肥坑内再盖上土,尽量防止养分流失,充分发挥肥效。

1.3 土壤样品的采集与分析方法 于2022年10月在各个处理利用5点取样法采集0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土样,为减少误差,土壤鲜质量在野外现场测定,以计算土壤含水量。将土样分为两部分:一部分新鲜土样装入灭菌的自封袋中,放入便携式冷藏箱(4℃左右)运到实验室,用于硝态氮、铵态氮、土壤酶活性的分

表 1 试验样地不同处理的施肥量

Tab. 1 The amount of fertilizer applied in different treatments in test plots

施肥设置 Treatment	单个施肥坑 6 月份施肥量 Fertilization rate in a single fertilizer pit in June			
	尿素/g Urea/g	过磷酸钙/g Superphosphate/g	氯化钾/g Potassium chloride/g	有机肥/kg Organic fertilizer/kg
不施肥(CK) No fertilization (CK)	/	/	/	/
常规施肥(NPK) Conventional fertilization (NPK)	608.70	1 166.00	300.00	/
替代 25% 化学氮肥(25%M) Replacement of 25% chemical nitrogen fertilizer (25% M)	456.52	1 031.63	289.48	12.15
替代 50% 化学氮肥(50%M) Replacement of 50% chemical nitrogen fertilizer (50% M)	304.35	897.27	278.97	24.31
替代 75% 化学氮肥(75%M) Replacement of 75% chemical nitrogen fertilizer (75% M)	152.17	726.52	268.46	36.46
替代 100% 化学氮肥(100%M) Replacement of 100% chemical nitrogen fertilizer (100% M)	/	628.61	257.95	48.61

注:“/”表示施肥量为 0。
Note: “/” indicates that the amount of fertilizer applied is 0.

析;另一部分新鲜土样装入布袋带回实验室,自然风干后一部分研磨过 10 目筛用于土壤 pH 实验分析,另一部分研磨过 100 目筛进行有机碳和全氮等指标的实验分析。

土壤理化性质的测定参照《土壤农化分析》^[20]。pH 值采用水:土=2.5:1 浸提—pH 计(PHS-3G)法测定;土壤含水量(SWC)采用 105 ℃烘干—称量法测定;有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量法—外加热法测定;全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定;速效磷(AvP)采用 0.03 mol·L⁻¹ NH₄F-0.025 mol·L⁻¹ HCl 浸提—钼锑抗比色法测定;铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)采用 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提—连续流动分析仪测定。

采用微孔板荧光法^[9]和全自动酶标仪(WD-2102B)测定 4 种具有代表性的土壤酶活性,包括 1 种参与碳循环的酶:β-1,4-葡萄糖苷酶(BG),可有效表征有机肥添加后的碳代谢活性;2 种参与氮循环的酶:L-亮氨酸氨基肽酶(LAP)、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG);参与土壤磷转化相关的酶:酸性磷酸酶(AP)。

1.4 数据处理 为使数据尽量服从正态分布,对土壤 C、N、P 酶化学计量比数据进行对数转化,其中 lnBG/ln(NAG+LAP)为酶 C:N、lnBG/lnAP 为酶 C:P、ln(NAG+LAP)/lnAP 为酶 N:P。运用单因素

方差分析法(One-way ANOVA)分析不同有机肥替代化学氮肥比例土壤理化性质、胞外酶活性及其化学计量比差异,采用 LSD 法多重比较同一土层下各变量在不同有机肥替代化学氮肥比例间的差异。以土壤 C、N、P 酶活性作为因变量,土壤理化性质为自变量,使用随机森林模型对不同土壤理化因子进行重要性评价,以确定各土壤因子对土壤 C、N、P 相关酶的活性的重要性。本研究采用 SPSS 21.0 进行数据统计分析,用 Origin 2023 和 R 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同比例有机肥替代化学氮肥处理下的土壤养分特征 与 NPK 处理相比,0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层 SOC 含量 25%M 处理分别显著提高 18.6%、27.4%、64.8%、20.7%(*P* < 0.05)(图 1-a);0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层土壤 TN 含量 75%M 处理分别显著提高 24.9%、32.2%(*P* < 0.05)(图 1-b);0 ~ 10 cm 土层土壤 NO₃⁻-N 含量在 75%M 和 100%M 处理分别显著提高 168.6%和 114.8%(*P* < 0.05)(图 1-c);0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层土壤 NH₄⁺-N 含量在 25%M 处理分别显著提高 21.6%、60.6%、41.1%(*P* < 0.05)(图 1-d);0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层土

壤AvP含量在100%M处理分别显著提高195.1%和135.8% ($P < 0.05$) (图1-e); 与CK处理相比, NPK、

50%M、75%M和100%M处理显著降低了10~20 cm和40~60 cm土层土壤pH ($P < 0.05$) (图1-f)。

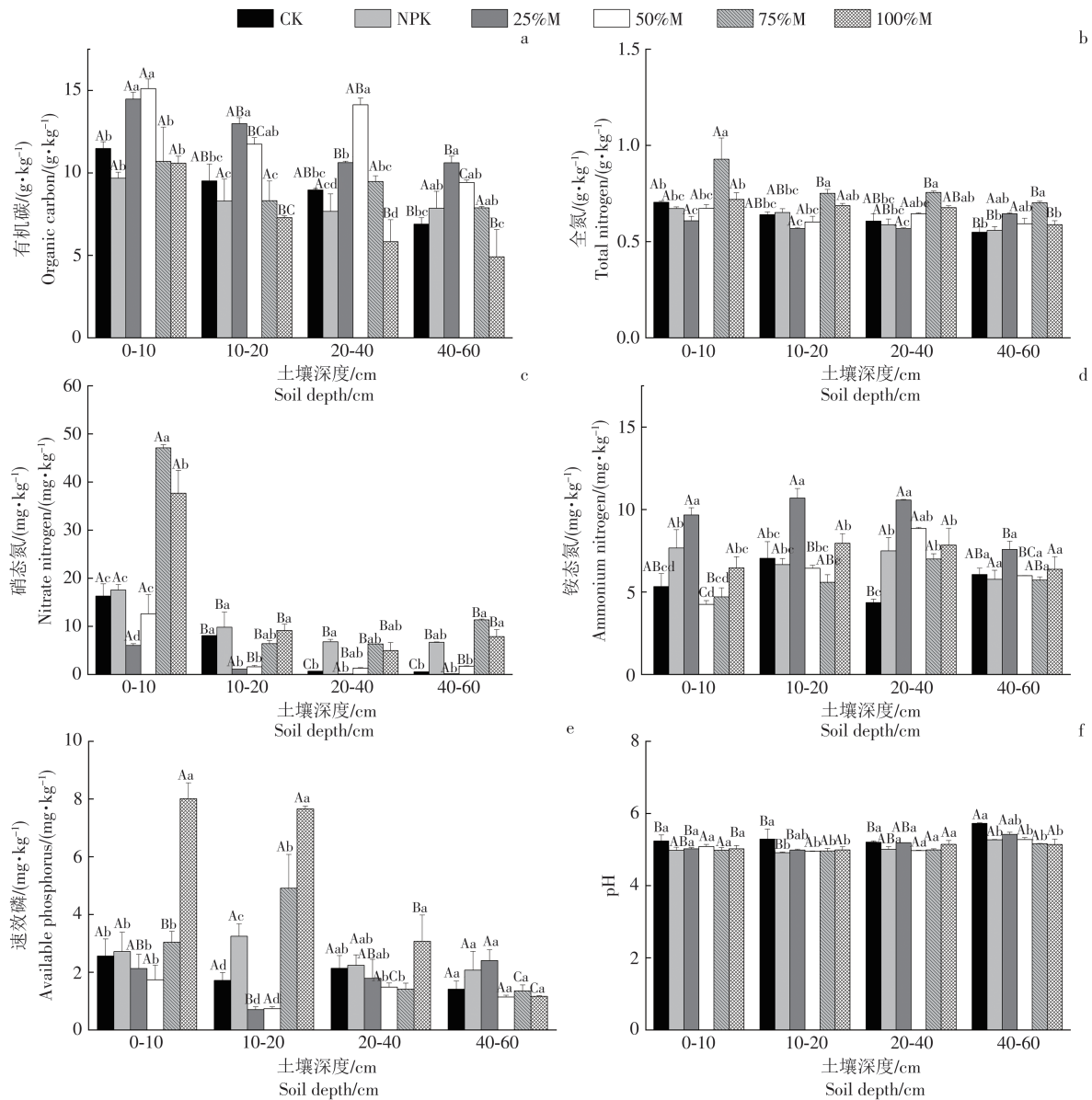


图1 不同施肥比例下土壤养分在不同土层间的变化特征

图中不同小写字母表示同一土层不同施肥处理间差异显著,不同大写字母表示同一施肥处理不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 Variation characteristics of soil nutrients in different soil layers under the treatment with different fertilizer ratios

Different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments in the same soil layer, and different capital letters indicate significant differences between different soil layers in the same fertilization treatment ($P < 0.05$).

2.2 有机肥替代化学氮肥的不同比例处理下的土壤酶活性特征 与CK处理相比, NPK处理显著提高0~10 cm和10~20 cm土层土壤C循环酶活性 ($P < 0.05$), 75%M处理显著提高10~20 cm和40~60 cm土层土壤C循环酶活性 ($P < 0.05$) (图2-a); NPK处理显著提高0~10 cm、10~20 cm土层土壤

N循环酶活性 ($P < 0.05$), 75%M处理显著提高10~20 cm和40~60 cm土层土壤N循环酶活性 ($P < 0.05$) (图2-b); NPK处理显著提高0~10 cm和10~20 cm土层土壤P循环酶活性 ($P < 0.05$), 75%M处理显著提高10~20 cm和40~60 cm土层土壤P循环酶活性 ($P < 0.05$) (图2-c)。

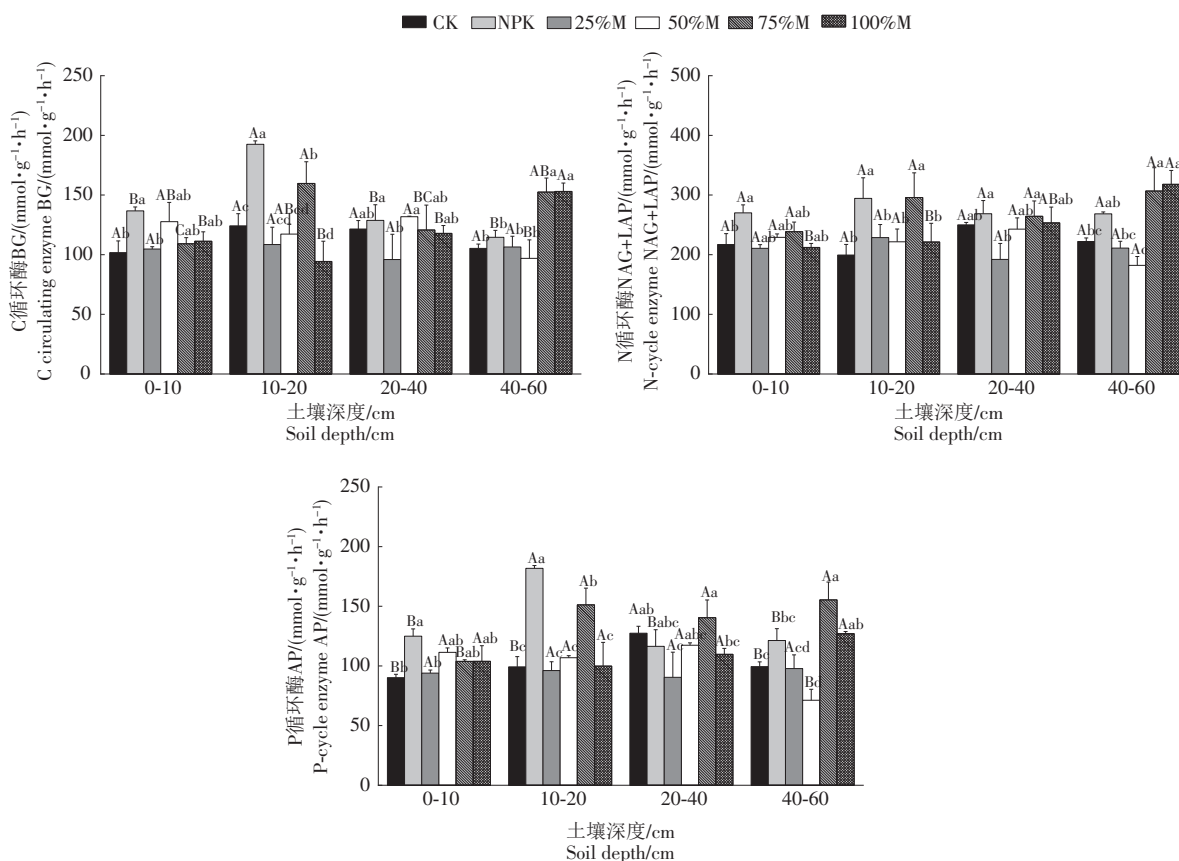


图2 不同施肥比例下土壤酶活性在不同土层间的变化特征

图中不同小写字母表示同一土层不同施肥处理间差异显著,不同大写字母表示同一施肥处理不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 2 Variation characteristics of soil enzyme activity in different soil layers under the treatments with different fertilizer ratios

Different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments in the same soil layer, and different capital letters indicate significant differences between different soil layers in the same fertilization treatment ($P < 0.05$).

不同施肥比例下的酶化学计量比的分析结果(表2)表明:土壤酶C:N化学计量比为0.81~0.98;土壤酶C:P化学计量比0.94~1.12;土壤酶N:P化学计量比1.03~1.22。与NPK处理相比,75%M、100%M处理显著降低10~20 cm土层的酶C:N化学计量比,25%M处理显著提高20~40 cm土层的酶C:N化学计量比,50%M处理显著提高40~60 cm土层的酶C:N化学计量比($P < 0.05$);100%M处理显著提高了40~60 cm土层的酶C:P化学计量比($P < 0.05$),0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm土层各有机肥替代处理均无显著差异;25%M、100%M处理显著提高了10~20 cm土层的酶N:P化学计量比,25%M处理显著降低了20~40 cm土层的酶N:P化学计量比($P < 0.05$),0~10 cm、40~60 cm土层各有机肥替代处理均无显著差异。

2.3 土壤理化性质与酶活性的关系 对土壤理化性质与土壤酶活性进行Spearman相关性分析结果(表3)表明,C循环酶活性与pH呈极显著负相关关系;N循环酶活性与SOC呈极显著负相关关系、与pH呈显著负相关关系;P循环酶活性与SOC、pH呈负相关关系。利用随机森林模型对影响土壤酶活性的土壤理化因子进行重要性评估结果(图3)表明,影响C循环酶活性的主要因子是pH、SWC、SOC、TN,其重要性占71.1%(图3-a);影响N循环酶活性的主要影响因子是SOC、pH、SWC、AvP,其重要性占73.6%(图3-b);影响P循环酶活性主要影响因子是SWC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、pH,其重要性占75.6%(图3-c)。

2.4 不同比例有机肥替代化学氮肥处理橡胶单株累积产量 对本试验样树在2022年期间的橡胶单株累积产量进行统计(以胶乳鲜样计)的结果(图4)显示,

表2 不同施肥比例下土壤酶化学计量比在不同土层间的变化特征

Tab. 2 Characteristics of soil enzyme stoichiometry in different soil layers under the treatments with different fertilizer ratios

土壤深度/cm Soil depth/cm	处理 Treatment	土壤酶化学计量比 Soil enzyme stoichiometric ratio		
		酶 C:N Enzyme C:N	酶 C:P Enzyme C:P	酶 N:P Enzyme N:P
		Enzyme C:N	Enzyme C:P	Enzyme N:P
0 ~ 10	CK	0.880 ± 0.009 Ba	1.153 ± 0.016 Aa	1.016 ± 0.024 Ba
	NPK	0.887 ± 0.008 Ba	1.154 ± 0.013 Aa	1.024 ± 0.009 Aa
	25%M	0.868 ± 0.005 Ba	1.198 ± 0.016 Aa	1.040 ± 0.017 Aa
	50%M	0.890 ± 0.021 Aa	1.140 ± 0.016 ABa	1.015 ± 0.037 Aa
	75%M	0.870 ± 0.004 Aa	1.172 ± 0.015 Aa	1.020 ± 0.015 Aa
	100%M	0.877 ± 0.019 Aa	1.170 ± 0.033 Aa	1.026 ± 0.024 Aa
10 ~ 20	CK	0.948 ± 0.019 Aa	1.156 ± 0.024 Aa	1.094 ± 0.016 Aa
	NPK	0.948 ± 0.013 Aa	1.070 ± 0.015 Bb	1.014 ± 0.003 Ab
	25%M	0.901 ± 0.016 ABab	1.188 ± 0.005 Aa	1.071 ± 0.024 Aab
	50%M	0.909 ± 0.021 Aab	1.139 ± 0.012 ABa	1.034 ± 0.013 Ab
	75%M	0.894 ± 0.007 Ab	1.125 ± 0.005 Aab	1.006 ± 0.003 Ab
	100%M	0.881 ± 0.018 Ab	1.180 ± 0.022 Aa	1.040 ± 0.024 Ab
20 ~ 40	CK	0.858 ± 0.005 Bb	1.162 ± 0.004 Aab	0.996 ± 0.009 Ba
	NPK	0.841 ± 0.022 Cb	1.171 ± 0.029 Aa	0.984 ± 0.018 ABa
	25%M	0.928 ± 0.046 Aa	1.090 ± 0.050 Bb	1.009 ± 0.004 ABa
	50%M	0.877 ± 0.001 Aab	1.164 ± 0.003 Aa	1.021 ± 0.002 Aa
	75%M	0.880 ± 0.025 Aab	1.127 ± 0.027 Aab	0.991 ± 0.004 Aa
	100%M	0.863 ± 0.015 Ab	1.176 ± 0.019 Aa	1.015 ± 0.003 Aa
40 ~ 60	CK	0.867 ± 0.002 Bab	1.151 ± 0.002 Aab	0.997 ± 0.004 Bab
	NPK	0.833 ± 0.001 Cb	1.134 ± 0.004 ABab	0.944 ± 0.002 Bb
	25%M	0.864 ± 0.016 Bab	1.132 ± 0.005 ABab	0.978 ± 0.022 Bb
	50%M	0.917 ± 0.007 Aa	1.081 ± 0.050 Bb	0.991 ± 0.039 Aab
	75%M	0.850 ± 0.006 Ab	1.160 ± 0.059 Aa	0.985 ± 0.043 Aab
	100%M	0.874 ± 0.016 Aab	1.188 ± 0.012 Aa	1.038 ± 0.012 Aa

注:同行数据后不同小写字母表示同一土层不同施肥处理间差异显著,不同大写字母表示同一施肥处理不同土层间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same row of values indicate significant difference between different fertilization treatments in the same soil layer, and different uppercase letters indicate significant difference between different soil layers in the same fertilization treatment ($P < 0.05$).

表3 土壤理化性质与土壤酶活性的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between soil physicochemical properties and soil enzyme activity

	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TN	SOC	AvP	pH	SWC	BG	NAG+LAP	AP
NO ₃ ⁻ -N	1.000									
NH ₄ ⁺ -N	-0.279*	1.000								
TN	0.645**	-0.081	1.000							
SOC	-0.026	0.325*	0.357**	1.000						
AvP	0.361**	-0.050	0.509**	-0.058	1.000					
pH	-0.251	-0.224	-0.352**	-0.174	-0.239	1.000				
SWC	-0.048	0.218	-0.012	0.308*	-0.007	-0.214	1.000			
BG	0.209	0.137	0.143	-0.098	-0.076	-0.473**	-0.033	1.000		
NAG+LAP	0.129	-0.031	0.108	-0.375**	0.070	-0.290*	-0.042	0.494**	1.000	
AP	-0.037	-0.153	-0.017	-0.185	0.031	-0.067	-0.029	0.511**	0.645**	1.000

注:**、*分别代表0.01、0.05的显著性水平。

Note: ** and * represent significance levels of 0.01 and 0.05, respectively.

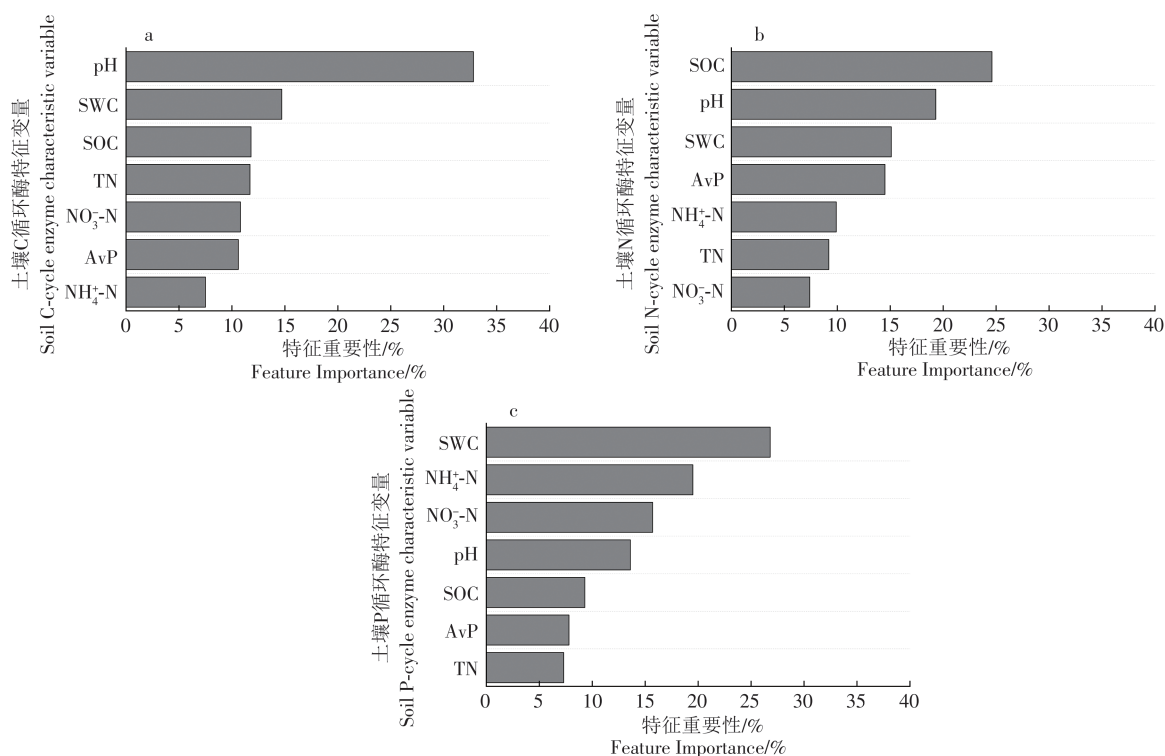


图3 影响土壤C、N、P酶活性不同土壤理化因子的重要性评分

Fig. 3 Importance score of different physical and chemical factors affecting soil C, N and P enzyme activities

2022年不同施肥处理橡胶树单株累积产量为7.0~9.6 kg,其中75%M处理单株累积产量最高,50%M和100%M处理次之。与NPK处理相比,50%M、75%M和100%M处理均显著提高了橡胶单株累积产量($P < 0.05$),增幅分别为11.9%、16.4%和11.8%。

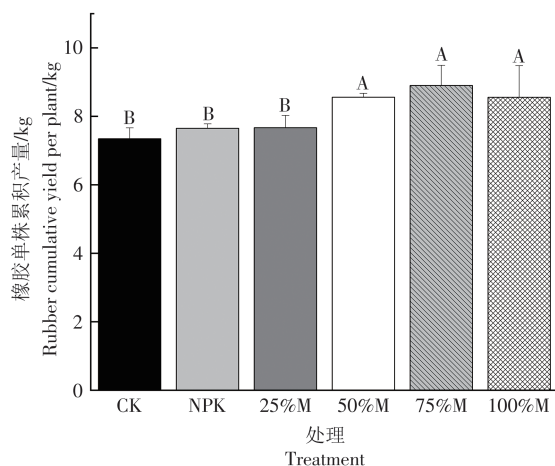


图4 不同施肥比例下橡胶单株累积产量

Fig. 4 Cumulative yield per single rubber plant under different fertilization ratios

图中不同大写字母表示不同施肥处理间差异显著($P < 0.05$)。

The difference between different fertilization treatments was significant ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 不同比例有机肥替代化学氮肥处理对土壤养分的影响 本研究结果表明,与NPK处理相比,25%M处理均显著提高0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层土壤SOC含量(图1-a)。这可能是因为施用有机肥或有机无机肥配施直接向土壤中输入外源有机碳,可增加土壤活性有机碳含量和碳库管理指数^[21],但只有适量的有机肥替代化学氮肥才会促使土壤有机质的增加,较高比例的有机肥替代化学氮肥会导致能被吸收利用的氮素含量减少,则可能导致有机质的下降^[22]。土壤中有机碳的分解还受到土壤微生物的碳、氮平衡的影响,高肥力土壤C/N的降低,微生物的活性提高,土壤中有足够量的氮源供微生物消耗,微生物同化同质量的氮需要消耗更多的碳,不利于有机质在土壤中的累积^[23]。另外,可能是因为施肥方式的改变、割胶活动的进行以及有机肥养分释放的缓慢性,导致在施肥后的较短时间内,较低的有机肥替代化学氮肥比例对提升SOC的效果显著更能满足割胶期间橡胶树对养分的需求,而较高的有机肥替代化学氮肥比例则对SOC的提升效果

不显著。

本研究结果表明,与 NPK 处理相比,75%M 处理显著提高 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤 TN 含量(图 1-b)。与 Shao 等^[24]在长期的野外施肥研究结果一致,有机肥施用相对于单独施用化学氮肥显著增加了土壤 TN 含量,一方面,因为牛粪有机肥中的养分可积累在上层土壤中,缓慢释放^[25],所以有机肥替代化学氮肥处理对 TN 含量提升效果显著。另一方面,因为有机肥对土壤 TN 含量的提升是由于长期施肥过程中无机氮肥往往会通过浸出、挥发或径流的方式损失,而有机肥替代化学氮肥可以通过改善土壤结构和增加土壤微生物量来增加土壤中氮的储存和利用,从而增加土壤 TN 的含量^[26-28]。

本研究结果表明,与 NPK 处理相比,100%M 处理显著提高 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤 AvP 含量(图 1-e)。与大多数研究结果相似,与 NPK 处理相比,长期使用有机肥能够显著提高土壤 AvP 的含量^[29],且有机肥替代比例更高的处理速效磷含量更高^[30]。主要是因为,牛粪有机肥配施后,可以减少化肥与土壤的接触,降低化肥被土壤固定的几率,提高了养分的有效性,并且生物有机肥含有一定量的速效养分,这也在一定程度上增加土壤速效养分含量^[31-32],但是最主要的原因可能在于本研究中 100%M 处理的有机肥中 P 的有效含量大于 NPK 处理,所以导致其有效磷含量显著高于 NPK 处理。

3.2 不同有机肥替代化学氮肥处理对土壤酶活性、酶化学计量比及橡胶单株累积产量的影响 本研究结果表明,与 CK 处理相比,75%M 处理显著提高了 10~20 cm 和 40~60 cm 土层土壤 C、N、P 循环酶活性(图 2),与余高、巩庆利等^[17,33]的研究结果相似,高比例的有机肥替代化学氮肥处理能显著提高 BG、NAG、AP 酶活性。主要是因为土壤酶主要由土壤微生物和动植物残体产生,有机肥添加增加了土壤微生物的可利用 C 源,促进了它们的新陈代谢和繁殖,从而促进了土壤酶活性^[34];其次,有机肥改善了土壤的理化性质,为土壤微生物和动物群体的生长提供了更好的环境,进而加速了它们对有机质的分解,这反过来又为土壤酶提供了更多的底物,从而促进土壤酶活性的增加^[35]。

本研究结果表明,土壤 C:N 酶化学计量比

(0.81~0.98)低于全球平均水平(1.41),土壤 C:P 酶化学计量比(0.94~1.12)大于全球平均值(0.62);而土壤 N:P 酶化学计量比(1.03~1.22)也大于全球平均值(0.44)^[36]。这说明该地区土壤受到 N 养分的限制相对严重,其主要原因可能是 10 月份还在持续割胶,而大量的排胶活动会使橡胶树带走较多的土壤 N 养分,与微生物获取土壤 N 形成了养分竞争的现象,从而导致了微生物 N 养分限制的发生使橡胶的养分过度消耗,造成土壤养分的 N 限制。

本研究结果表明,与 NPK 处理相比,50%M、75%M 和 100%M 处理均显著提高了橡胶单株累积产量,增幅分别为 11.9%、16.4% 和 11.8%(图 4)。这与徐文娴等^[19]在等氮替代的原则下进行不同比例的有机肥替代化学氮肥研究结果一致,即有机肥替代 75%M 和 100%M 的化肥处理橡胶产量最高。另外有研究表明,有机肥替代 75% 化学氮肥较单施化学氮肥优化了产量三要素构成,进而显著增加了作物总产量^[37]。也有研究表明,不同比例有机肥替代化学氮肥处理一定程度上均可增加作物产量^[38],因为随着有机肥投入量增加,土壤获得 N 源的同时也获得了部分 C 源,与单施化肥相比,养分更平衡,因此有机肥替代化学氮肥对乳胶产量有一定的促进作用。

4 结 论

与 NPK 处理相比,有机肥替代化学氮肥可显著提高 0~10 cm、10~20 cm 土壤的 SOC、TN、AvP 含量;50%M、75%M 和 100%M 处理均显著提高橡胶单株累积产量。与 CK 处理相比,常规施用化学氮肥显著提高土壤 C、N、P 循环酶活性,但不同有机肥替代化学氮肥处理对土壤 C、N、P 循环酶活性的影响存在差异。合理比例(75%M 替代比例)的有机肥替代氮肥能够提高橡胶林表层土壤的养分含量,增强土壤酶活性,有利于土壤养分的循环和转化,提高橡胶树对养分的吸收利用效率进而能有效橡胶产量。

参考文献:

- [1] 海南省市场监督管理局、海南省农业农村厅、海南省林业局.《海南省天然橡胶产业标准体系》[EB/OL]. 海南省市场监督管理局, 2023-08-15. [2023-12-07]. <https://>

- amr. hainan. gov. cn/zw/gsgg/qtgsgg/202308/t20230815_3475479.html.
- [2] 王大鹏, 罗雪华, 郭澎湃, 等. 橡胶林氮肥施用后在土壤中的残留、累积和迁移[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1361-1368.
- [3] CHEN C, LIU W, WU J, et al. Can intercropping with the cash crop help improve the soil physico-chemical properties of rubber plantations? [J]. Geoderma, 2019, 335: 149-160.
- [4] 张焱华, 何鹏, 吴敏, 等. 橡胶园土壤酶活性与土壤肥力的关系[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 375-379.
- [5] WANG Y, ZHU Y C, ZHANG S X, et al. What could promote farmers to replace chemical fertilizers with organic fertilizers? [J]. Cleaner Production, 2018, 199(20): 882-890.
- [6] SALEHI A, FALLAH S, SOURKI A A. Organic and inorganic fertilizer effect on soil CO₂ flux, microbial biomass, and growth of *Nigella sativa* L[J]. International Agrophysics, 2017, 31(1): 103-116.
- [7] SARMA B, FAROOQ M, GOGOI N, et al. Soil organic carbon dynamics in wheat-Green gram crop rotation amended with vermicompost and biochar in combination with inorganic fertilizers: a comparative study[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 471-480.
- [8] GUO Z, HAN J, LI J, et al. Correction: effects of long-term fertilization on soil organic carbon mineralization and microbial community structure[J]. PLoS One, 2019, 14(4): e0216006.
- [9] 李佳乐. 有机肥替代化学氮肥(尿素)对橡胶幼苗生长和胶园土壤碳氮环境的影响[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- [10] 李更新, 马凤静, 李祥英, 等. 有机肥施用对烟田土壤理化性质的影响[J]. 农业研究与应用, 2018, 31(6): 5-10.
- [11] CUI Y, FANG L, GUO X, et al. Eoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 116: 11-21.
- [12] CUI Y, BING H, FANG L, et al. Diversity patterns of the rhizosphere and bulk soil microbial communities along an altitudinal gradient in an alpine ecosystem of the eastern Tibetan Plateau[J]. Geoderma, 2019, 338: 118-127.
- [13] TAPIA-TORRES Y, ELSER J J, SOUZA V, et al. Eoenzymatic stoichiometry at the extremes: how microbes cope in an ultra-oligotrophic desert soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 87: 34-42.
- [14] 闫本帅, 孙利鹏, 李晶晶, 等. 辽东栎林次生演替过程中土壤酶化学计量特征变化[J]. 生态学杂志, 2022, 41(4): 641-647.
- [15] SINSABAUGH R L, LAUBER C L, WEINTRAUB M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. Ecology Letters, 2008, 11(11): 1252-1264.
- [16] 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 等. 红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1960-1967.
- [17] 余高, 陈芬, 谢英荷, 等. 有机肥替代化肥比例对黄壤土活性有机碳及酶活性的影响[J]. 中国蔬菜, 2020(4): 48-55.
- [18] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 壤土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 22-32.
- [19] 徐文娟. 绿肥还田及有机肥替代化学氮肥对橡胶园土壤养分的影响研究[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 1-97.
- [21] TONG X, XU M, WANG X, et al. Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. CATENA, 2014, 113: 251-259.
- [22] 杨晓东, 孙萍, 胡涛, 等. 有机肥部分替代氮肥对南粳9108产量及土壤理化现状的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(3): 559-562.
- [23] 吴志祥, 谢贵水, 陶忠良, 等. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1484-1491.
- [24] SHAO X F, XU M G, ZHANG W J, et al. Changes of soil carbon and nitrogen and characteristics of nitrogen mineralization under long-term manure fertilization practices in black soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20: 326-335.
- [25] 原寒, 徐子雯, 岑宇, 等. 不同有机肥对土壤养分及大蒜生长发育的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(7): 60-66.
- [26] WEI M, HU G, WANG H, et al. 35 years of manure and chemical fertilizer application alters soil microbial community composition in a Fluvo-aquic soil in Northern China[J]. European Journal of Soil Biology, 2017, 82: 27-34.
- [27] LIU J, SHU A, SONG W, et al. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. Geoderma, 2021, 404: 115287.
- [28] 黄尚书, 江新风, 朱同, 等. 有机肥全量替代化肥对茶园土壤机械稳定团聚体无机氮分布特征的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(4): 141-151.
- [29] 王亚奇, 杜桂英, 崔晓文, 等. 一次性施入牛粪对土壤肥力和土壤微生物及酶活性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 181-186.
- [30] 符学知, 魏孔亮, 罗微, 等. 有机肥替代化肥处理对橡胶开割树生长状况的影响[J]. 特种经济动植物, 2022, 25(1): 23-28.
- [31] DHAKAL Y, MEENA R S, KUMAR S. Effect of INM on nodulation, yield, quality and available nutrient status in soil after harvest of greengram[J]. Legume Research-An International Journal, 2016, 39(4): 590-594.
- [32] 何进勤, 雷金银, 韩乃荣, 等. 牛粪不同处理配施化肥对旱地土壤养分及玉米生物性状的影响[J]. 天津农业

- 科学, 2021, 27(2): 73–76.
- [33] 巩庆利, 翟丙年, 郑伟, 等. 渭北旱地苹果园生草覆盖下不同肥料配施对土壤养分和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 205–212.
- [34] KAUTZ T, LÓPEZ-FANDO C, ELLMER F. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in Central Spain[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(3): 278–285.
- [35] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5502–5511.
- [36] SINSABAUGH R L, HILL B H, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, 462(7274): 795–798.
- [37] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516–523.
- [38] 罗佳, 蒋小芳, 孟琳, 等. 不同堆肥原料的有机无机复合肥对油菜生长及土壤供氮特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 97–106.

Effects of different proportions of organic fertilizer replacing chemical nitrogen fertilizer on soil nutrients and enzyme activities of rubber plantations in Hainan Island

LU Wen^{1,2}, XU Wenxian³, SU Tianyan^{1,2}, YU Lei^{1,2}, JIANG Yamin^{1,2}, LU Jingli^{1,2},
LIU Wenjie^{1,2}, YANG Qiu^{1,2}

(1. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Key Laboratory of Agro-Forestry Environmental Processes and Ecological Regulation of Hainan Province, Haikou, Hainan 570228, China; 3. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China)

Abstract: The effects of different proportions of organic fertilizer replacing chemical nitrogen fertilizer on soil nutrient and enzyme activity in rubber plantations is of great significance for selecting a reasonable substitution ratio and the sustainable development of natural rubber. The rubber plantations in Zhubijiang Farm, Baisha Li Autonomous County, Hainan Province was selected as the subject, and six different treatments were set up from June 2022 using the principle of equal nitrogen application: no fertilizer treatment (CK), Conventional fertilizer treatment (NPK), organic fertilizer replacing 25% chemical nitrogen treatment (25% M), organic fertilizer replacing 50% chemical nitrogen treatment (50% M), organic fertilizer replacing 75% chemical nitrogen treatment (75% M), organic fertilizer replacing 100% chemical nitrogen treatment (100% M). Soil samples of 0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm, 20 ~ 40 cm and 40 ~ 60 cm were collected after fertilization for 4 months, and the characteristics of soil nutrients and enzyme activities were analyzed. The results showed that 1) compared with the NPK treatment, the 25% M and 50% M treatments significantly increased the soil organic carbon (SOC) content in 0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm, 20 ~ 40 cm and 40 ~ 60 cm soil layers. The 75% M treatment significantly increased soil total N (TN) content in all soil layers at 0 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm. The 75% M and 100% M significantly increased the content of soil nitrate-N (NO_3^- -N) in 0 ~ 10 cm soil layer. The 25% M treatment significantly increased the content of soil NH_4^+ -N in 0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm, and 20 ~ 40 cm soil layers. The 100% M treatment significantly increased the content of soil available P (AvP) in 0 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm soil layers. 2) Compared with the CK treatment, the 75% M treatment significantly increased activities of C (β -1,4-glucosidase, BG), N (L-leucine aminopeptidase, LAP; β -1, 4-N-Acetyl Glucosaminase (AP)), P (Acid phosphatase, AP) cycling enzymes in the 10 ~ 20 cm and 40 ~ 60 cm soil layers. The pH, SOC, soil water content (SWC), TN, AvP, NH_4^+ -N and NO_3^- -N were the main factors affecting the activities of C, N and P cycle.

3) Random forest model showed that compared with the NPK treatment, the 50% M, 75% M and 100% M treatments significantly increased the rubber yield per plant by 11.9%, 16.4% and 11.8%, respectively. In summary, the 75% substitution ratio of organic fertilizer is effective on increasing the soil TN content and soil C, N, and P cycle-related enzyme activity, thereby improving the rubber plantation soil environment, better increasing the individual rubber yield, promoting the sustainable development of rubber production.

Keywords: rubber plantation; organic fertilizer replacement; soil enzyme activity; soil enzyme ecostochiometry; soil nutrients

(责任编辑:叶 静)