

控释尿素与普通尿素配施对橡胶树叶片和胶乳养分及产量的影响

杨红竹^{1,2}, 黄艳艳^{1,2}, 冀春花^{1,2}, 刘海林^{1,2*}, 林清火^{1,2}, 茶正早^{1,2}, 罗 微^{1,2}

1. 中国热带农业科学院橡胶研究所/中国热带农业科学院土壤肥料研究中心/省部共建国家重点实验室培育基地-海南省热带作物栽培生理学重点实验室, 海南海口 571101; 2. 儋州橡胶林土壤环境海南省野外科学观测研究站, 海南儋州 571737

摘 要: 为了明确控释尿素与普通尿素配施在橡胶树上的应用效果, 通过 2 年田间试验, 研究了减氮条件下控释尿素与普通尿素不同比例配施对橡胶树产量、叶片和胶乳矿质养分及土壤氮含量的影响, 为橡胶树栽培管理中合理施氮提供技术支撑。结果表明: 控释尿素与普通尿素配施可提高橡胶树干胶产量和叶片氮含量, 与常规施肥相比, 橡胶树干胶产量增幅为 16.28%~39.13% (2021 年) 和 7.94%~9.69% (2022 年), 叶片氮含量增幅为 10.54%~19.17% (2021 年) 和 10.24%~21.50% (2022 年), 控释尿素与普通尿素配施处理叶片氮含量均处于正常值以上。控释尿素与普通尿素配施还能够增加胶园肥穴土壤碱解氮含量, 较常规施肥增加了 11.27%~80.36%。控释尿素与普通尿素配施比例为 50:50 时, 橡胶树干胶产量 (2022 年)、叶片氮含量 (2021—2022 年) 和土壤碱解氮含量 (2021—2022 年) 均显著高于常规施肥。综上所述, 在本试验条件下, 控释尿素与普通尿素配施比例为 50:50 能够获得较高的干胶产量, 可改善叶片营养状况, 维持土壤氮水平, 有利于实现橡胶树施肥管理的绿色协同增效。

关键词: 橡胶树; 控释尿素; 普通尿素; 产量; 叶片养分

中图分类号: S794.1 文献标志码: A

Effect of Combined Application of Controlled-release Urea and Common Urea on Leaf Nutrient, Latex Nutrient, and Yield in Rubber Tree

YANG Hongzhu^{1,2}, HUANG Yanyan^{1,2}, JI Chunhua^{1,2}, LIU Hailin^{1,2*}, LIN Qinghuo^{1,2}, CHA Zhengzao^{1,2}, LUO Wei^{1,2}

1. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Soil and Fertilizer Research Center, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / State Key Laboratory Incubation Base for Cultivation & Physiology of Tropical Crops, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Danzhou Soil Environment of Rubber Plantation, Hainan Observation and Research Station, Danzhou, Hainan 571737, China

Abstract: In order to clarify the application effect of controlled-release urea combined with common urea on rubber trees, a 2-year field experiment was conducted to study the effects of different proportions of controlled-release urea combined with common urea on the yield, leaf and latex mineral nutrients and soil nitrogen content of rubber trees under the condition of nitrogen reduction, and to provide a reference base for reasonable nitrogen application in the cultivation of rubber trees. The results showed that the combined application of controlled-release urea and common urea increased the dry rubber yield and the nitrogen content of leaves. Compared with conventional fertilization, the dry rubber yield increased by 16.28%–39.13% (2021) and 7.94%–9.69% (2022), nitrogen content in leaves increased by 10.54%–19.17%

收稿日期 2024-01-12; 修回日期 2024-03-05

基金项目 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFD2301201); 国家现代农业产业技术体系建设专项 (No. CARS-33-ZP2); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630022022002)。

作者简介 杨红竹 (1974—), 女, 本科, 实验师, 研究方向: 土壤农化分析与高效施肥技术。*通信作者 (Corresponding author): 刘海林 (LIU Hailin), E-mail: hlliuf@163.com。

(2021) and 10.24%–21.50% (2022), and the leaf nitrogen content of the combined application of controlled-release urea combined and common urea was above normal value. Combined application of controlled-release urea and common urea also increased the soil alkali-hydrolytic nitrogen content in the fertilization hole of rubber plantation by 11.27%–80.36% compared with conventional fertilization. When the ratio of controlled release urea and common urea was 50:50, the dry rubber yield (2022), leaf nitrogen content (2021–2022) and soil alkali-hydrolyzed nitrogen content (2021–2022) were significantly higher than those of conventional fertilization. Overall, under the conditions of this experiment, the combination of controlled-release urea and common urea at a ratio of 50 : 50 could obtain a higher dry rubber yield, improve the nutritional status of leaves, maintain soil nitrogen level, and help to achieve green and efficient fertilizer management of rubber trees.

Keywords: rubber tree; controlled-release urea; common urea; yield; leaf nutrient

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.09.011

天然橡胶是重要的战略物资和工业原料,也是我国热区农业的重要支柱产业之一^[1]。天然橡胶主要来源于巴西橡胶树,开割后的橡胶树养分消耗量大,而施肥可为橡胶树产胶和生长提供必要的养分,是橡胶树栽培中一项重要的管理措施^[2-4]。有研究表明,施肥可以促进橡胶树生长,增加橡胶树胶乳产量^[5-7],有利于维持橡胶树生产的可持续性。然而,橡胶树栽培区域高温多雨、土壤保肥能力较差,加之橡胶树栽培中化肥不合理施用,导致肥料利用效率低,易造成资源浪费和环境污染^[8-10]。

缓/控释肥料可控制肥料养分缓慢释放,定期供给养分,具有提高养分利用率,减少养分流失,减轻施肥对环境造成污染等优点^[11-13],施用缓/控释肥料被认为是协调作物营养需求与肥料养分供应的高效施肥技术之一^[14],也是实现我国化肥减量增效的重要措施^[15]。缓/控释肥料已成为我国新型肥料发展的主导方向,在水稻、玉米和小麦等大田作物上进行大面积应用^[16-17]。刘兆辉等^[18]研究发现,一次性基施缓/控释肥料可使水稻、玉米和小麦三大粮食作物产量提高 3.1%~31.7%,氮肥利用率提高 6.2%~86.6%。有研究也表明,施用缓/控释肥料能够促进橡胶苗生长和养分吸收^[19-21]。曲均峰^[22]研究发现,脲醛缓释肥料与普通尿素掺混施用可提高橡胶树胶乳产量,节省劳动力。然而,缓/控释肥料在开割橡胶树上应用相对较少,且前人研究仅关注橡胶树胶乳产量。为此,本研究将以包膜控释尿素与普通尿素为研究材料,通过 2 年大田试验,研究减氮条件下控释尿素与普通尿素配施对橡胶树产量、叶片和胶乳矿质养分及土壤氮含量的影响,为橡胶树栽培管理中合理

施氮和减氮增效提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2021—2022 年在海南天然橡胶产业集团股份有限公司邦溪分公司芙蓉田派驻组三队进行。供试橡胶树品种为 PR107, 2004 年定植,按 S/2 d 6 0.5% ET (12 d) 割制 (1/2 树围、每 6 d 割 1 刀,每 12 d 涂施 1 次 0.5% 乙烯利) 进行割胶。供试肥料为包膜控释尿素 (氮含量 43%, 肥效期 3 个月)、普通尿素 (氮含量 46%)、氯化钾 (K_2O 60%)、磷酸二铵 (N 18%、 P_2O_5 46%) 以及颗粒填充料。土壤理化性质为: 全氮 0.84 g/kg, 有效磷 4.85 mg/kg, 速效钾 66.38 mg/kg, 有机质 12.38 g/kg, pH 5.04。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验设置 4 个施肥处理: (1) CK (常规施肥); (2) C_{25} (控释尿素与普通尿素配施, 比例为 25 : 75); (3) C_{50} (控释尿素与普通尿素配施, 比例为 50 : 50); (4) C_{75} (控释尿素与普通尿素配施, 比例为 75 : 25)。CK 处理的橡胶树施肥量为每株橡胶树施用 376 g N、131 g P_2O_5 、142 g K_2O , 控释尿素与普通尿素配施处理均较 CK 处理减氮 20%, 每个处理 3 个树位, 每个树位为 1 个重复。各处理试验所需肥料按照施肥量, 以包膜控释尿素、普通尿素、氯化钾、磷酸二铵以及填充料为原料进行掺混。控释尿素与普通尿素配施处理分 2 次施用, 施肥时期分别为 4 月 (236.8 g N、56 g P_2O_5 、72 g K_2O) 和 9 月 (64 g N、75 g P_2O_5 、70 g K_2O); CK 处理按照前期 (148 g N、28 g P_2O_5 、36 g K_2O)、中期 (148 g N、28 g P_2O_5 、36 g K_2O) 和后期 (80

g N、75 g P₂O₅、70 g K₂O) 分 3 次施肥 (4、6、9 月), 施肥时在位于 2 株橡胶树之间萌生带的肥穴内开沟, 施入肥料后覆土^[23]。

1.2.2 样品采集与测定 (1) 橡胶树叶片样品采集与测定。根据橡胶树叶片营养诊断技术规程 GB/T 2957—2013, 在每年 8 月采集橡胶树叶片样品, 采用“S”型采样路线, 每个树位选择 20 株橡胶树作为采样树, 分别在每株树两侧采集冠层主侧枝上稳定老化顶蓬叶 2 蓬, 在每蓬叶上取其基部上的 2 片复叶, 并将每片复叶两旁的小叶去掉, 留中间的一片叶作为样品。叶片样品洗净后在 105 °C 下杀青 30 min, 于 75 °C 下烘干至恒重, 粉碎保存, 测定叶片氮、磷、钾、钙、镁含量。

(2) 胶乳养分和生理指标测定。在每年常规施肥处理第 2 次施肥后 45 d^[24], 每个小区选择 30 株橡胶树作为采样树, 收集流出的胶乳, 将同一小区胶树的胶乳混合为一个样品, 冰浴并带回实验室, 一部分胶乳样品用于测定胶乳硫醇、蔗糖、无机磷和总固形物含量, 一部分胶乳样品加入玻璃培养皿中, 在 80 °C 下烘干至恒重, 用于测定胶乳中总氮、磷、钾、钙、镁、锰、铜、铁、锌含量。胶乳中的硫醇、蔗糖、无机磷和总固形物含量分别采用 DTNB 试剂法、蒽酮比色法、钼酸铵比色法和烘干法进行测定^[25]; 胶乳总氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, SEAL AA3 连续流动分析仪测定, 胶乳磷、钾含量分别采用钼锑抗比色法和火焰光度计法测定, 胶乳钙、镁含量采用原子吸收分光光度法测定, 胶乳锰、铜、铁、锌含量采用 ICP-MS 测定。

(3) 土壤样品采集与测定。在每年常规施肥处理第 2 次施肥后 45 d, 采集肥穴施肥位置土壤

样品。土壤采样深度为 0~20 cm, 采用“S”型采样路线, 每个树位选择 10 个肥穴采集土壤样品。采集土壤带回实验室后, 风干保存, 采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量, 采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量。

(4) 干胶产量测定。试验期间记录每个树位全年总干胶产量, 将每年度每个树位全年干胶产量除以开割树株数, 即为各施肥处理的橡胶树单株干胶产量。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据统计和整理, 利用 SPSS 22.0 软件进行统计分析, 利用 Microsoft Excel 2016 和 OriginPro 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 控释尿素与普通尿素配施对橡胶树叶片养分含量的影响

由表 1 可知, 与 CK 处理相比, 控释尿素与普通尿素配施处理可改善橡胶树叶片营养状况, 提高橡胶树叶片氮含量。2021 年, C₂₅、C₅₀、C₇₅ 处理橡胶树叶片氮含量分别较 CK 处理增加 10.54%、19.17%、19.17%, 其中 C₅₀ 和 C₇₅ 处理显著高于 CK 处理 ($P<0.05$), 而控释尿素与普通尿素配施处理间差异不显著。2022 年, C₂₅、C₅₀、C₇₅ 处理橡胶树叶片氮含量分别较 CK 施肥处理增加 11.26%、10.24%、21.50%, 其中 C₇₅ 处理显著高于 CK 处理 ($P<0.05$), 但 C₇₅ 处理与 C₂₅、C₅₀ 处理间差异不显著。另外, 与 CK 处理相比, 控释尿素与普通尿素配施处理对橡胶树叶片磷、钾、钙和镁含量均无显著影响。

表 1 控释尿素与普通尿素配施对橡胶树叶片养分含量的影响

Tab. 1 Effect of combined application of common urea and controlled-release urea on leaf nutrient content

年份 Year	处理 Treatment	养分含量 Nutrient content/%				
		N	P	K	Ca	Mg
2021	CK	3.13±0.05 ^b	0.24±0.00 ^a	1.10±0.10 ^a	1.15±0.08 ^a	0.27±0.02 ^a
	C ₂₅	3.46±0.38 ^{ab}	0.24±0.01 ^a	1.19±0.08 ^a	1.00±0.14 ^a	0.29±0.03 ^a
	C ₅₀	3.73±0.08 ^a	0.23±0.04 ^a	1.13±0.22 ^a	0.95±0.09 ^a	0.27±0.01 ^a
	C ₇₅	3.73±0.26 ^a	0.24±0.02 ^a	1.26±0.20 ^a	0.94±0.13 ^a	0.29±0.01 ^a
2022	CK	2.93±0.06 ^b	0.21±0.01 ^{ab}	1.15±0.09 ^a	0.81±0.10 ^a	0.19±0.02 ^a
	C ₂₅	3.26±0.08 ^{ab}	0.22±0.01 ^a	1.17±0.06 ^a	0.66±0.04 ^a	0.19±0.01 ^a
	C ₅₀	3.23±0.07 ^{ab}	0.19±0.01 ^b	1.07±0.01 ^a	0.63±0.07 ^a	0.17±0.01 ^a
	C ₇₅	3.56±0.17 ^a	0.21±0.01 ^{ab}	1.18±0.06 ^a	0.64±0.05 ^a	0.18±0.01 ^a

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.2 控释尿素与普通尿素配施对橡胶树胶乳养分含量的影响

由表 2 可知, 2021—2022 年, 各施肥处理胶乳氮含量介于 0.49%~0.64%之间; 与 CK 处理相比, 2021—2022 年, 控释尿素与普通尿素配施处理的胶乳氮含量均有所增加, 但处理间均无显著差异。2021—2022 年, 各施肥处理胶乳磷含量和镁含量也表现出类似规律。2021 年, C₂₅、C₅₀、C₇₅ 处理胶乳钾含量均高于 CK 处理, 其中 C₂₅ 处理显著大于 CK

处理 ($P<0.05$), 而控释尿素与普通尿素配施处理间差异不显著; 2022 年各施肥处理胶乳钾含量无显著差异。2021—2022 年, 控释尿素与普通尿素配施对橡胶树胶乳钙、铁、锌和铜含量均无显著影响。2021 年, 控释尿素与普通尿素配施处理降低了橡胶树胶乳锰含量, 其中 C₂₅ 处理显著小于 CK 处理 ($P<0.05$), 而控释尿素与普通尿素配施处理间差异不显著; 2022 年, 控释尿素与普通尿素配施处理也降低了胶乳锰含量, 但均与 CK 处理差异不显著。

表 2 控释尿素与普通尿素配施对橡胶树胶乳养分含量的影响
Tab. 2 Effect of combined application of common urea and controlled-release urea on latex nutrient content

年份 Year	处理 Treatment	养分含量 Nutrient content								
		N/%	P/%	K/%	Mg/%	Ca /(mg·kg ⁻¹)	Fe /(mg·kg ⁻¹)	Mn /(mg·kg ⁻¹)	Zn /(mg·kg ⁻¹)	Cu /(mg·kg ⁻¹)
2021	CK	0.49±0.14 ^a	0.17±0.08 ^a	0.32±0.12 ^b	0.05±0.03 ^a	36.71±7.11 ^a	19.00±2.10 ^a	5.75±0.15 ^a	6.31±0.94 ^a	2.07±1.31 ^a
	C ₂₅	0.62±0.02 ^a	0.23±0.02 ^a	0.45±0.01 ^a	0.08±0.01 ^a	36.59±5.14 ^a	21.58±5.26 ^a	4.27±1.15 ^b	6.90±0.20 ^a	3.53±1.13 ^a
	C ₅₀	0.50±0.05 ^a	0.18±0.05 ^a	0.36±0.03 ^{ab}	0.06±0.01 ^a	35.42±3.23 ^a	18.35±2.79 ^a	4.60±0.59 ^{ab}	7.13±1.04 ^a	2.15±1.05 ^a
	C ₇₅	0.57±0.04 ^a	0.22±0.06 ^a	0.39±0.04 ^{ab}	0.09±0.01 ^a	33.79±0.91 ^a	21.41±1.91 ^a	4.54±0.53 ^{ab}	7.26±0.75 ^a	2.63±0.44 ^a
2022	CK	0.58±0.05 ^a	0.08±0.01 ^a	0.37±0.08 ^a	0.05±0.02 ^a	7.80±4.75 ^a	19.23±4.81 ^a	9.93±0.52 ^a	4.75±0.26 ^a	3.17±0.38 ^a
	C ₂₅	0.64±0.01 ^a	0.09±0.01 ^a	0.40±0.01 ^a	0.07±0.01 ^a	12.52±6.70 ^a	19.62±2.28 ^a	9.68±2.28 ^a	4.56±0.63 ^a	3.04±0.55 ^a
	C ₅₀	0.60±0.04 ^a	0.08±0.02 ^a	0.37±0.05 ^a	0.05±0.02 ^a	8.38±2.17 ^a	16.78±1.14 ^a	9.59±0.72 ^a	5.08±1.82 ^a	3.37±0.03 ^a
	C ₇₅	0.61±0.03 ^a	0.09±0.01 ^a	0.39±0.04 ^a	0.06±0.02 ^a	8.78±2.38 ^a	16.87±0.85 ^a	9.09±0.53 ^a	7.09±2.80 ^a	3.36±0.92 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 控释尿素与普通尿素配施对橡胶树胶乳生理参数的影响

从图 1 可以看出, 2021 年, 控释尿素与普通尿素配施处理均在一定程度上增加了胶乳硫醇和无机磷含量, 但各施肥处理间差异不显著; 与 CK 处理相比, C₂₅ 处理对胶乳总固形物含量无显著影响, 但显著增加了胶乳蔗糖含量 ($P<0.05$), 蔗糖含量提高了 46.75%。2022 年, 控释尿素与普通尿素配施处理对胶乳总固形物含量、硫醇含量、蔗糖含量以及无机磷含量均未产生影响, 各施肥处理间的胶乳生理参数均无显著差异。

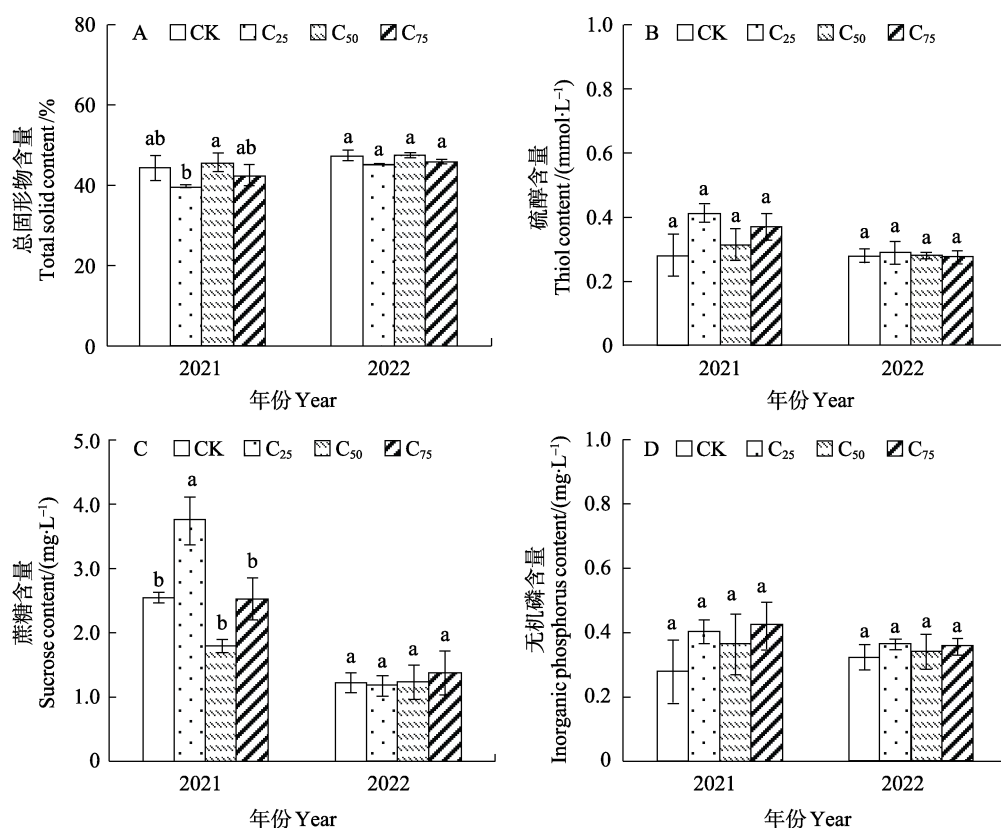
2.4 控释尿素与普通尿素配施对橡胶树产量的影响

由图 2 可以看出, 2021 年各施肥处理橡胶树干胶产量介于 3.05~4.24 kg/株之间, 2022 年干胶产量为 2.56~2.81 kg/株。与 CK 处理相比, 控释尿素与普通尿素配施处理 (C₂₅、C₅₀、C₇₅) 均在不同程度上提高了橡胶树干胶产量。2021 年, C₂₅、C₅₀、C₇₅ 处理橡胶树单株干胶产量分别较 CK 处理增加了 39.13%、16.28%、19.02%, 但各施肥处

理间无显著差异。2022 年, C₂₅、C₅₀、C₇₅ 处理橡胶树单株干胶产量分别较 CK 处理增加 8.07%、9.69%、7.94%, 其中 C₅₀ 处理干胶产量显著高于 CK 处理 ($P<0.05$); C₅₀ 处理干胶产量较 C₂₅、C₇₅ 处理提高了 1.50%和 1.62%, 但处理间无显著差异。C₂₅、C₇₅ 处理与 CK 处理间也无显著差异。

2.5 控释尿素与普通尿素配施对胶园肥穴土壤氮含量的影响

由图 3 可知, 控释尿素与普通尿素配施未能增加胶园肥穴土壤全氮含量, 2021—2022 年各施肥处理胶园肥穴土壤全氮含量均无显著差异。然而, 与 CK 处理相比, 控释尿素与普通尿素配施处理能够增加胶园肥穴土壤碱解氮含量。2021 年, C₂₅、C₅₀、C₇₅ 处理土壤碱解氮含量分别较 CK 处理提高了 27.52%、80.36%、11.27%, 其中 C₅₀ 处理土壤碱解氮含量达到 187.70 mg/kg, 显著大于 CK 处理和 C₇₅ 处理 ($P<0.05$), 但与 C₂₅ 处理差异不显著。2022 年, 随着控释尿素与普通尿素配施比例增加, 胶园肥穴土壤碱解氮含量逐渐增加, C₂₅、C₅₀、C₇₅ 处理土壤碱解氮含量介于 141.68~

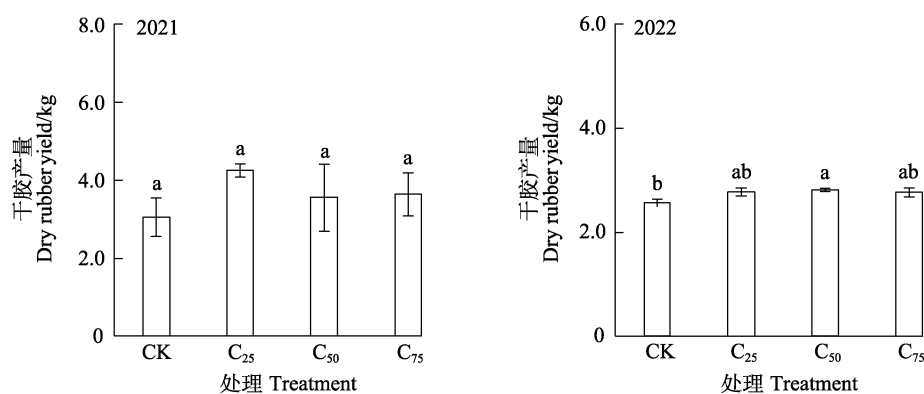


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 不同施肥处理对胶乳生理参数的影响

Fig. 1 Physiological parameters of rubber latex between different fertilization treatments



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同施肥处理对橡胶树产量的影响

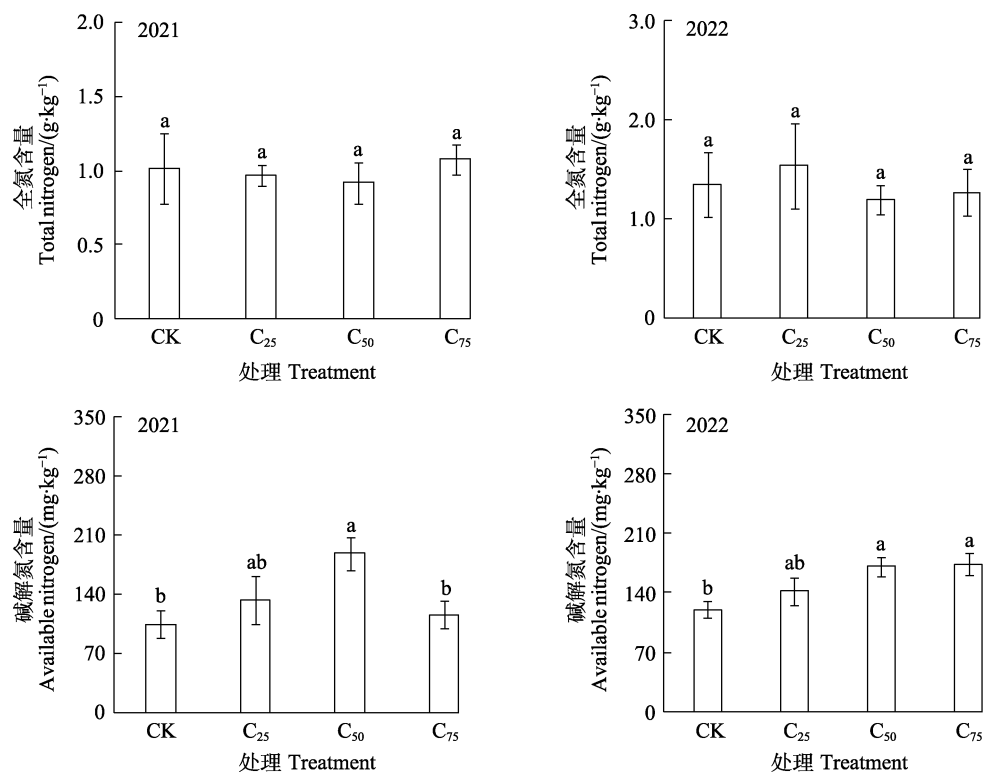
Fig. 2 Dry rubber yield of rubber tree between different fertilization treatments

173.86 mg/kg 之间, 分别较 CK 处理提高了 18.05%、42.52%、44.86%, 其中 C₅₀、C₇₅ 处理显著大于 CK 处理 ($P < 0.05$), 而控释尿素与普通尿素配施处理间无显著差异。

3 讨论

氮素是橡胶树维持正常生长的主要营养元

素, 合理施用氮肥对于橡胶树高产稳产具有重要作用^[26-27]。控释氮肥是一种环境友好型肥料, 可延缓养分释放, 减少氮素损失, 提高作物产量, 已被广泛应用于农业生产中^[28]。施用控释氮肥被认为是作物氮肥高效管理策略之一, 尤其是控释氮肥与普通尿素配合施用不仅可以降低生产成本, 还能够避免因控释氮肥前期养分释放缓慢而



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同施肥处理对胶园肥穴土壤全氮和碱解氮含量的影响

Fig. 3 Soil total nitrogen and available nitrogen content in fertilization hole of rubber plantation between different fertilization treatments

无法满足作物需求^[29]。高雪健等^[30]研究表明,控释尿素与普通尿素配施可显著提高糯玉米产量,促进氮素吸收利用。韩锐锋等^[31]研究发现,控释尿素与普通尿素混合基施能够显著提高冬小麦籽粒产量和氮素利用率。本研究 2 年试验结果也表明,与常规施肥处理相比,控释尿素与普通尿素配施可以提高橡胶树干胶产量,2 年干胶增产率为 7.94%~39.13%,其中 2022 年 C₅₀ 处理(控释尿素与普通尿素配施比例为 50:50)橡胶树干胶产量显著高于 CK 处理。曲均峰^[22]综合考虑橡胶树胶乳产量和肥料成本,认为 60%脲醛缓释肥与 40%普通尿素配施效果最好,该配施比例也与本研究结果接近。

橡胶树叶片营养元素含量是衡量橡胶树营养状况的关键指标,与橡胶树生产能力密切相关^[32]。安锋等^[33]研究表明,橡胶树产量与橡胶树叶片氮含量呈正相关。本研究结果表明,控释尿素与普通尿素配施可改善橡胶树叶片营养状况,提高橡胶树叶片氮含量,叶片氮含量较 CK 处理提高了 10.24%~21.50%,而且 2021 年 C₅₀ 处理和 C₇₅ 处

理(控释尿素与普通尿素配施比例为 75:25)的叶片氮含量显著高于 CK 处理,但是控释尿素与普通尿素配施处理间无显著差异。控释尿素与普通尿素配施处理的橡胶树叶片氮含量介于 3.23%~3.73%之间,达到或超过了橡胶树叶片营养诊断技术规程 GB/T 2957—2013 规定的海南省主要品种橡胶树叶片氮含量正常值(3.2%~3.4%),而 2021—2022 年常规施肥处理橡胶树叶片氮含量分别为 3.13%和 2.93%,叶片氮含量处于缺乏状态。表明控释尿素与普通尿素配施能够减少氮素损失,保证土壤氮素缓慢供应,有利于橡胶树吸收氮素,从而增加叶片氮含量,这可能是控释尿素与普通尿素配施能够提高橡胶树产量的主要原因之一。前人研究也发现,随着施肥量增加,土壤氮素供应增强,有利于橡胶树叶片氮素累积^[34]。另外,2 年田间试验中控释尿素与普通尿素配施处理胶乳中部分矿质养分含量也略高于 CK 处理,但无显著差异,可能是由于橡胶树是多年生高大乔木,树体储藏了较多的营养,控释尿素与普通尿素配施虽然可以促进橡胶树氮素

吸收,然而根系吸收的矿质养分向胶乳转移过程存在滞后^[4],且本研究仅是参照文献方法^[24]采集了施肥后 1 次胶乳样品,而胶乳生理参数和矿质养分含量容易受物候、气候和割胶技术等影响,可能存在于一个动态调整变化过程,在后期试验中还有待采集全年胶乳样品进一步测定评估。

橡胶树种植在高温、高湿和强降雨的热带地区,土壤保肥能力较差,养分易淋失,合理施用氮肥对于减少胶园氮素损失,补充土壤氮库和提高土壤肥力极为重要^[27]。而胶园土壤养分含量与橡胶树产量呈正相关^[33]。本研究结果表明,控释尿素与普通尿素配施能够增加胶园肥穴土壤碱解氮含量,2021—2022 年土壤碱解氮含量增加了 11.27%~80.36%,其中 C₅₀ 处理在 2021—2022 年均显著高于 CK 处理,2021 年和 2022 年分别提高了 80.36%和 42.52%。这主要是由于控释尿素的氮素缓慢释放,减少氮素损失,不断补充土壤氮库,从而能够维持土壤氮水平。前人研究也表明,与施用普通氮肥相比,施用控释氮肥可增加表层土壤速效氮含量^[31]。这也说明控释尿素与普通尿素配施可以通过缓慢释放氮素,维持土壤氮水平,促进橡胶树氮素吸收,从而发挥橡胶树生产能力,提高橡胶树产量。

4 结论

在减氮条件下控释尿素与普通尿素配施可改善橡胶树营养状况,增加橡胶树叶片氮含量和胶园肥穴土壤碱解氮含量,提高橡胶树干胶产量。在热带地区橡胶树实际生产中,综合考虑橡胶树产量、叶片营养、土壤氮水平和肥料成本,控释尿素与普通尿素配施比例为 50:50 时效果最好,可实现绿色节本协同增效。

参考文献

- [1] 张晓飞,黄肖,李维国. 4 个引进橡胶树胶木兼优品种比较试验[J]. 热带作物学报, 2023, 44(3): 526-534.
ZHANG X F, HUANG X, LI W G. Comparison experiment of four introduced timber/latex clones in *Hevea brasiliensis*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(3): 526-534. (in Chinese)
- [2] JAWITT W, KROEZE C, RATTANAPAN S. Greenhouse gas emissions from rubber industry in Thailand[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(5): 403-411.
- [3] 林清火,雷菲,刘海林,华元刚,茶正早,罗微. 包膜尿素在胶园土壤中养分解特性研究[J]. 热带作物学报, 2018, 39(11): 2113-2117.
LIN Q H, LEI F, LIU H L, HUA Y G, CHA Z Z, LUO W. Nitrogen release characteristics of coated urea in rubber plantation soils[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(11): 2113-2117. (in Chinese)
- [4] 王大鹏,吴敏,韦家少,薛欣欣,马照娜,王桂花,茶正早. 不同施氮水平下橡胶树产量效应及胶乳矿质养分变化[J]. 热带作物学报, 2021, 42(9): 2549-2554.
WANG D P, WU M, WEI J S, XUE X X, MA Z N, WANG G H, CHA Z Z. Rubber yield and latex mineral nutrients variation under different nitrogen application rates[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(9): 2549-2554. (in Chinese)
- [5] CHOTIPHAN R, VAVASSE L, LACOTE R, GOHET E, THALER P, SAJJAPHAN K, BOTTIER C, CHAR C, LIENGPRAYOON S, GAY F. Can fertilization be a driver of rubber plantation intensification?[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 141: 111813.
- [6] HYTÖNEN J, NURMI J, KAAKKURIVAARA N, KAAKKURIVAARA T. Rubber tree (*Hevea brasiliensis*) biomass, nutrient content, and heating values in southern Thailand[J]. Forests, 2019, 10(8): 638.
- [7] ANASRULLAH A, SAJJAPHAN K, RATTANAPICHAI W, KASEMSAP P, NOUVELLON Y, CHURA D, CHAWAWAT C, CHOTIPHAN R. The dynamics of immature rubber photosynthetic capacities under macronutrients deficiencies[J]. Trends in Sciences, 2023, 20(5): 4527.
- [8] LIU C A, LIANG M Y, NIE Y, TANG J W, SIDDIQUE K H M. The conversion of tropical forests to rubber plantations accelerates soil acidification and changes the distribution of soil metal ions in topsoil layers[J]. Science of The Total Environment, 2019, 696: 134082.
- [9] ZHOU W J, JI H L, ZHU J, ZHANG Y P, SHA L Q, LIU Y T, ZHANG X, ZHAO W, DONG Y X, BAI X L, LIN Y X, ZHANG J H, ZHENG X H. The effects of nitrogen fertilization on N₂O emissions from a rubber plantation[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28230.
- [10] 丘秀灵,成铁龙,罗微,茶正早,孟磊. 海南胶园土壤 NO₃⁻-N 淋洗风险评估及影响因素分析[J]. 热带作物学报, 2009, 30(4): 420-424.
QIU X L, CHENG T L, LUO W, CHA Z Z, MENG L. Soil nitrate leaching risk assessment in rubber plantations in Hainan and analysis of its influencing factors[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, 30(4): 420-424. (in Chinese)
- [11] HEUCHAN S M, FAN B, KOWALSKI J J, GILLIES E R, HENRY H A L. Development of fertilizer coatings from po-

- lyglyoxylate-polyester blends responsive to root-driven pH change[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(46): 12720-12729.
- [12] FERTAHI S, ILSOUK M, ZEROUAL Y, OUKARROUM A, BARAKAT A. Recent trends in organic coating based on biopolymers and biomass for controlled and slow release fertilizers[J]. *Journal of Controlled Release*, 2021(330): 341-361.
- [13] 刘永红, 郑文涛, 张晋天, 马忠华, 蒯婕, 汪波, 周广生. 缓/控释肥研究进展及其应用[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(4): 167-176.
- LIU Y H, ZHENG W T, ZHANG J T, MA Z H, KUAI J, WANG B, ZHOU G S. Progress and its application of slow/controlled release fertilizers in agricultural production[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(4): 167-176. (in Chinese)
- [14] SUMAN J, RAKSHIT A, PATRA A, DUTTA A, TRIPATHI V K, MOHAPATRA K K, TIWARI R, KRISHNAMOORTHY S. Enhanced efficiency N fertilizers: an effective strategy to improve use efficiency and ecological sustainability[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(2): 1472-1488.
- [15] 邹国元, 曹兵, 李丽霞, 肖强, 李吉进. 缓控释肥料研发需要长期坚持[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(8): 1220-1229.
- ZOU G Y, CAO B, LI L X, XIAO Q, LI J J. It is necessary to develop the slow and controlled release fertilizer continuously[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(8): 1220-1229. (in Chinese)
- [16] 赵秉强, 袁亮. 我国绿色高效化肥产品创新与产业发展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(11): 2143-2149.
- ZHAO B Q, YUAN L. Innovation and industrial development of green efficiency fertilizers in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(11): 2143-2149. (in Chinese)
- [17] 丁文成, 何萍, 周卫. 我国新型肥料产业发展战略研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(2): 201-221.
- DING W C, HE P, ZHOU W. Development strategies of the new-type fertilizer industry in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(2): 201-221. (in Chinese)
- [18] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 李彦, 江丽华. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3827-3839.
- LIU Z H, WU X B, TAN D S, LI Y, JIANG L H. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3827-3839. (in Chinese)
- [19] 刘海林, 杨凯, 杨红竹, 林清火, 茶正早, 罗微. 控释氮肥比例对橡胶苗生长和养分吸收的影响[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(3): 1-6.
- LIU H L, YANG K, YANG H Z, LIN Q H, CHA Z Z, LUO W. Effects of the mixed ratio of controlled nitrogen in the control-released urea on the growth and nutrient absorption of rubber tree seedlings[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(3): 1-6. (in Chinese)
- [20] 刘海林, 杨凯, 杨红竹, 林清火, 罗微, 茶正早. 脲醛缓释肥料棒对橡胶苗生长和养分吸收的影响[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(12): 2679-2684.
- LIU H L, YANG K, YANG H Z, LIN Q H, LUO W, CHA Z Z. Effects of urea formaldehyde slow release fertilizer rod on growth and nutrient absorption of rubber tree seedlings[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(12): 2679-2684. (in Chinese)
- [21] 贝美容, 倪维茜, 林清火, 茶正早, 刘海林, 罗微. 缓释氮肥对橡胶幼苗生物量及养分积累的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(12): 2867-2871.
- BEI M R, NI W Q, LIN Q H, CHA Z Z, LIU H L, LUO W. Effects of slow-released nitrogen fertilizer on growth and nutrient accumulation of rubber seedlings [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(12): 2867-2871. (in Chinese)
- [22] 曲均峰. 脲醛缓释肥在橡胶树上的肥效研究[J]. *磷肥与复肥*, 2013, 28(5): 84-85.
- QU J F. Study on fertilizer efficiency of urea formaldehyde slow release fertilizer on rubber tree[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2013, 28(5): 84-85. (in Chinese)
- [23] 任常琦, 张永发, 王帅, 罗雪华, 薛欣欣, 赵春梅, 王文斌. 不同施氮量及施氮比例对橡胶园土壤无机氮运移特征的影响[J]. *热带作物学报*, 2023, 44(8): 1605-1614.
- REN C Q, ZHANG Y F, WANG S, LUO X H, XUE X X, ZHAO C M, WANG W B. Effects of different nitrogen application and ratios on the transportation characteristics of soil inorganic nitrogen in rubber plantations[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2023, 44(8): 1605-1614. (in Chinese)
- [24] 华元刚, 贝美容, 刘海林, 杨红竹, 林清火, 茶正早. 氮磷钾配方施肥提升天然橡胶生胶性能[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(4): 623-628.
- HUA Y G, BEI M R, LIU H L, YANG H Z, LIN Q H, CHA Z Z. Formula fertilizing of N, P and K promoted properties of natural rubber[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40(4): 623-628. (in Chinese)
- [25] 仇键, 校现周, 高宏华, 杨文凤, 魏芳, 吴明, 罗世巧. 六天一刀割制对热研 7-33-97 幼龄开割橡胶树产量、胶乳生理及死皮病发生的影响[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(1): 133-139.
- QIU J, XIAO X Z, GAO H H, YANG W F, WEI F, WU M,

- LUO S Q. Effects of tapping per six days system on the yield, latex physiology and tapping panel dryness of young tapped *Hevea brasiliensis* var. Reyan 7-33-97[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(1): 133-139. (in Chinese)
- [26] 华元刚, 陈秋波, 林钊沐, 罗微. 水肥耦合对橡胶树产胶量的影响[J]. 应用生态学报, 2008(6): 1211-1216.
- HUA Y G, CHEN Q B, LIN Z M, LUO W. Coupling effects of water and chemical fertilizers on *Hevea brasiliensis* latex yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008(6): 1211-1216. (in Chinese)
- [27] 王大鹏, 罗雪华, 郭澎涛, 陈传洋, 张永发, 薛欣欣, 赵春梅, 吴小平, 茶正早. 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.
- WANG D P, LUO X H, GUO P T, CHEN C Y, ZHANG Y F, XUE X X, ZHAO C M, WU X P, CHA Z Z. Residue, accumulation and translocation of nitrogen fertilizer in soil of rubber plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(7): 1361-1368. (in Chinese)
- [28] SU N, RONG X M, XIE G X, CHANG T, ZHANG Y P, PENG J W, LUO G W. Effectiveness of a 10-year continuous reduction of controlled-release nitrogen fertilizer on production, nitrogen loss and utilization of double-cropping rice[J]. Science of The Total Environment, 2024, 912: 168857.
- [29] ZHANG G X, ZHAO D H, FAN H Z, LIU S J, LIAO Y C, HAN J. Combining controlled-release urea and normal urea with appropriate nitrogen application rate to reduce wheat stem lodging risk and increase grain yield and yield stability[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(10): 3006-3021.
- [30] 高雪健, 李广浩, 陆卫平, 陆大雷. 控释尿素与普通尿素配施对糯玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(9): 1614-1625.
- GAO X J, LI G H, LU W P, LU D L. Effects of mixing controlled-release and normal urea on yield, nitrogen absorption and utilization in waxy maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(9): 1614-1625. (in Chinese)
- [31] 韩锐锋, 牛增锡, 王鑫悦, 李国明, 林祥, 王瑞, 王东. 控释尿素和普通尿素混合基施对冬小麦氮素吸收利用和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(11): 2042-2058.
- HAN R F, NIU Y X, WANG X Y, LI G M, LIN X, WANG R, WANG D. Effect of mixed basal application of controlled release urea and common urea on the nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(11): 2042-2058. (in Chinese)
- [32] 杨丽萍, 黎小清, 杨春霞, 李春丽. 云南省不同营养类型橡胶树专用肥施用效果研究[J]. 西南农业学报, 2015, 28(6): 2610-2615.
- YANG L P, LI X Q, YANG C X, LI C L. Effects of specialty fertilizer on different rubber types in Yunnan province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(6): 2610-2615. (in Chinese)
- [33] 安锋, 谢贵水, 蒋菊生, 林位夫, 谢贻发, 潘育文, 邓建明, 何健, 盛堆, 谭四明, 尹仲明. 刺激割制下橡胶园养分状况及其与产量的关系[J]. 热带作物学报, 2005(3): 1-6.
- AN F, XIE G S, JIANG J S, LIN W F, XIE Y F, PAN Y W, DENG J M, HE J, SHENG D, TAN S M, YIN Z M. Nutrient conditions of rubber plantations and their relationship with latex yield under stimulated tapping system in Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2005(3): 1-6. (in Chinese)
- [34] 冀春花, 黄艳艳, 杨红竹, 赵家连, 茶正早. 不同施肥处理下橡胶苗对土壤养分吸收和分配的化学计量特征[J]. 热带生物学报, 2022, 13(5): 519-523.
- JI C H, HUANG Y Y, YANG H Z, ZHAO J L, CHA Z Z. Stoichiometric characteristics of soil nutrient absorption and distribution in young rubber plants under fertilizer treatment[J]. Journal of Tropical Biology, 2022, 13(5): 519-523. (in Chinese)