

复合施肥措施对土壤-橡胶树系统中锰含量及生胶性能的影响

孔意鹏^{1,2}, 王万新², 金东奇², 刘海林^{2,3}, 李建宏^{2,3}, 赵庆杰^{1*}, 林清火^{2,3*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南儋州 571737; 2. 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南海口 571101; 3. 儋州橡胶林土壤环境海南省野外科学观测站, 海南儋州 571737

摘要: 锰 (Mn) 元素是影响天然橡胶性能的重要因素之一, 探究不同施肥措施对橡胶园土壤、橡胶树根系和叶片、胶乳和生胶中 Mn 含量以及生胶性能的影响, 以期对橡胶树合理施肥及提高天然橡胶生胶性能提供理论依据。于 2022—2023 年选用热研 73397 橡胶品种进行大田试验, 采用单株橡胶树定量施肥, 主要为穴施与剖面涂施的复合施肥措施, 以不施肥为对照 (CK), 设置 5 个施肥处理: 2 kg 硅酸钠 (T₁)、0.5% 锌钼肥 (T₂)、5 kg 生物炭 (T₃)、5 kg 生物炭+0.5% 锌钼肥 (T₄)、5 kg 生物炭+0.5% 锌钼肥+2 kg 硅酸钠 (T₅)。在产胶期不同月份采集样品, 通过测定不同施肥模式下的干胶产量、各样品 (土壤、根系、叶、胶乳、生胶) Mn 含量和生胶性能, 分析不同施肥措施对土壤-橡胶树系统中 Mn 含量及生胶性能的影响。结果表明: 不同处理的橡胶树干胶产量在 44.96~62.90 g 之间; T₁、T₃、T₄、T₅ 处理可提升土壤 pH, 把土壤中易被植物利用的 Mn 形态转变成难利用的形态, 其中 T₅ 处理的效果更好, 且 T₅ 处理能显著降低橡胶树根系中的 Mn 含量; T₄、T₅ 处理能显著降低胶乳中的 Mn 含量; T₁ 处理能提高塑性保持率, T₂、T₃、T₄、T₅ 处理能提高生胶塑性初值, T₄、T₅ 处理能提高门尼黏度, T₂、T₃、T₄、T₅ 处理后的生胶塑性初值、塑性保持率、门尼黏度均达到航空轮胎用天然橡胶通用规范; 不同处理生胶的数均分子量和重均分子量分别在 $35.25 \times 10^4 \sim 39.57 \times 10^4$ 和 $161.84 \times 10^4 \sim 167.32 \times 10^4$ 之间, 各施肥处理均降低了分子量分散程度。综上所述, 生物炭、硅酸钠和锌钼肥配施能改善土壤环境, 能够影响橡胶树的产量、胶乳和生胶中的 Mn 含量, 进而影响生胶性能。基于本研究结果, 对于综合提高橡胶树产量和生胶性能而言, 可推荐 T₅ 处理, 即单株施用 5 kg 生物炭+0.5% 锌钼肥+2 kg 硅酸钠。

关键词: 天然橡胶; 施肥措施; 土壤-橡胶树系统; 锰含量; 生胶性能

中图分类号: S794.1

文献标志码: A

Effects of Fertilization Measures on Manganese Content in Soil-Rubber Tree System and Rubber Properties

KONG Yipeng^{1,2}, WANG Wanxin², JIN Dongqi², LIU Hailin^{2,3}, LI Jianhong^{2,3}, ZHAO Qingjie^{1*}, LIN Qinghuo^{2,3*}

1. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China; 2. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Danzhou Soil Environment of Rubber Plantation, Hainan Observation and Research Station, Danzhou, Hainan 571737, China

Abstract: Manganese (Mn) is a crucial element influencing the performance of natural rubber. This study investigated the effects of different fertilization strategies on Mn content in soil, rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) roots and leaves, latex and raw rubber, and the subsequent impact on rubber properties in rubber plantations. The aim was to provide theoretical insights for optimizing rubber tree fertilization and enhancing natural rubber properties. Field experiments were conducted from 2022 to 2023 in a RY 73397 variety rubber plantation. Quantitative fertilization was applied to individual rubber trees using a composite approach involving hole application and tapping panel. The control

收稿日期 2024-08-10; 接受日期 2024-10-02

基金项目 海南省重大科技项目 (No. ZDKJ2021004); 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFD2301201); 中国热带农业科学院国家热带农业科学中心科技创新团队项目 (No. CATASCXTD202303)。

作者简介 孔意鹏 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 橡胶树养分资源管理。*通信作者 (Corresponding author): 赵庆杰 (ZHAO Qingjie), E-mail: qingjiezhao@hainanu.edu.cn; 林清火 (LIN Qinghuo), E-mail: qinghuo@catas.cn。

group received no fertilizer treatment (CK), while five different fertilization treatments were implemented: 2 kg sodium silicate (T_1), 0.5% zinc molybdate fertilizer (T_2), 5 kg biochar (T_3), 5 kg biochar+0.5% zinc molybdate fertilizer (T_4) and 5 kg biochar+0.5% zinc molybdate fertilizer+2 kg sodium silicate (T_5). Samples were collected during various months of latex production period to determine dry rubber yield, Mn content in various samples (soil, roots, leaves, latex, raw rubber), and rubber properties under different fertilization strategies, analyzing their effects on Mn content and rubber properties within the soil-rubber tree system. The rubber yield from different treatments ranged from 44.96 g to 62.90 g. Treatments T_1 , T_3 , T_4 and T_5 increased soil pH value, and effectively transformed bioavailable forms of Mn into less available forms for rubber trees in soil, with treatment T_5 being most effective. Treatment T_5 also significantly reduced Mn content in rubber tree roots. The application of T_4 and T_5 treatments significantly reduced Mn content in latex. Treatment T_1 was effective in enhancing the plasticity retention, while treatments T_2 , T_3 , T_4 and T_5 were capable of improving the initial plasticity of raw rubber. Treatments T_4 and T_5 significantly increased the Mooney viscosity. Following the implementation of T_2 , T_3 , T_4 and T_5 treatments, the initial plasticity, plasticity retention, and Mooney viscosity of natural rubber all complied with the General Specifications for Natural Rubber Used in Aircraft Tires. The number-average molecular weight and weight-average molecular weight of raw rubber under different treatments ranged from 35.25×10^4 to 39.57×10^4 and from 161.84×10^4 to 167.32×10^4 , respectively, while also decreasing the molecular weight distribution. To summary, the combined application of biochar, sodium silicate, and zinc-molybdenum fertilizers can enhance soil conditions, affecting the yield of rubber trees and the manganese (Mn) content in both latex and raw rubber, which in turn influences the properties of raw rubber. Based on this study, the T_5 treatment (5 kg biochar+0.5% zinc molybdate fertilizer+2 kg sodium silicate per individual tree) is recommended for comprehensive enhancement of dry rubber yield and rubber properties.

Keywords: natural rubber; fertilization practices; soil-rubber tree system; Mn content; raw rubber properties

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.03.012

橡胶是重要的战略物资以及四大基础工业原料之一^[1], 按其来源可分为天然橡胶和合成橡胶, 世界上约有三分之一的橡胶制品必须用天然橡胶制造才能符合使用要求^[2]。巴西三叶橡胶树产量占天然橡胶总产量的 99% 以上, 因此通常也以天然橡胶代指巴西三叶橡胶树, 巴西三叶橡胶树主要种植于东南亚地区^[3-4]。与东南亚其他产胶国家相比, 我国由于温度、气候等因素导致生产的天然橡胶品质不佳, 力学性能指标偏低, 只能满足中低端大众化普通橡胶制品的要求^[5]。研究发现, 锰 (Mn)、铁 (Fe) 以及铜 (Cu) 等变价金属离子对橡胶的老化有自动氧化催化的作用, 从而降低橡胶的性能^[6-7]; Mn 对天然橡胶的起始分解温度影响最大, 与其他金属产生的协同效应能严重破坏天然橡胶的热稳定性^[8]。由于施肥措施能改变金属元素在土壤中的形态, 进而影响植物的吸收利用, 因此, 施肥措施是自然条件下人工调控天然橡胶性能的一项重要手段^[9]。

目前对于钝化土壤金属元素的方法有很多, 王晓琦等^[10]发现生物炭的施入能显著提高土壤 pH, 显著降低土壤有效态 Cu 的含量; 刘冲等^[11]在研究生物炭以及炭基肥料的施用对油麦菜吸收重金属的影响时发现, 油麦菜各部位的镉 (Cd)、

Cu、铅 (Pb)、锌 (Zn) 等含量均与生物炭以及炭基肥料的施用量呈负相关; 黄宗鸿等^[12]研究发现, 硅酸盐作为一种金属钝化剂通过改变土壤中的 pH 来降低金属的生物利用度, 从而提高植物抗氧化能力来减少重金属对植物的毒害; 黄巧云等^[13]研究发现, 施用硅 (Si) 能够降低铝 (Al) 的活性, 升高土壤 pH, 有利于麦苗根部吸收矿物元素。Zn 元素可通过拮抗作用抑制有毒元素在植物体内的累积, 减少其对植物的毒害作用^[14-15], 在油菜叶面喷施 Zn 肥能显著降低油菜可食用部位的 Cd 含量^[16]。钼 (Mo) 元素与多种元素均存在一定的交互作用, 在多种植物中证实了 Mo 与 Mn 具有拮抗关系^[17]。

虽然现有的研究表明, 通过施用生物炭、硅酸钠以及涂施锌钼肥等可以减少作物体内重金属含量, 但通过施肥措施调控土壤-天然橡胶体系中重金属含量及生胶性能的研究相对匮乏。假设不同施肥模式下施用生物炭、硅酸钠以及锌钼肥可对橡胶树的生长和胶乳产量及品质产生积极的影响, 本研究拟设置 5 种施肥处理, 研究复合施肥措施对橡胶树干胶产量、土壤-橡胶树系统中各部位 Mn 含量和生胶 Mn 含量及其生胶性能等方面的影响, 以期达到调控胶乳和生胶中 Mn 含

量并提高生胶性能的目的。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于海南省儋州市中国热带农业科学院试验场六队 (109.29'43"E, 9.28'41"N), 属于热带湿润季风气候, 年平均气温和降水量分别为 23.5 ℃和 1815 mm。

供试土壤类型为花岗岩发育的砖红壤, 土壤基础理化性质:pH 为 5.00、电导率为 60.40 μs/cm、有机质为 16.43 g/kg、速效磷为 90.27 mg/kg、速效钾为 141.24 mg/kg、铵态氮为 41.49 mg/kg、硝态氮为 13.66 mg/kg。试验区橡胶树品系为热研 73397, 定植于 2004 年, 株行距为 3 m×7 m, 树龄 18 a, 开割年限 11 a。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 以不施肥为对照 (CK), 设置 5 个施肥处理 (表 1)。每个小区共 5 行 5 列包含 25 株正常开割的橡胶树, 其中外围 16 株作为保护行, 中间 9 株作为采样区, 每个处理设置 3 次重复。生物炭与硅酸钠采用穴施的方式, 施肥于离树干 1.5 m 处的施肥穴底部 (施肥穴长宽深为 200 cm×60 cm×40 cm)。于 2022 年 4 月 28 日施用 1 次生物炭, 硅酸钠分别在 2022 年 4 月 28 日和 8 月 25 日均分 2 次施用; 利用 EDTA 锌和钼酸氢配制 0.5% 锌钼肥, 开割后每隔 15 d 涂施 1 次, 采用剖面涂施的方式均匀涂施在橡胶树当年割胶面, 全年共涂施 14 次。生物炭材料为小麦秸秆生物炭, 购自三利新能源有限公司淮北分公司; 硅酸钠材料购自山东金润梓生物科技有限公司; EDTA 锌和钼酸氢购自山东绿陇作物营养有限公司。试验期间橡胶树施肥、打药等按照常规管理。

1.2.2 样品采集与处理 于 2022 年 9 月 22 日、

10 月 11 日、11 月 2 日、12 月 6 日采集 4 次胶乳、土壤及植物样品, 结果均采用 4 次的平均值。

(1) 土壤: 各处理施肥区随机选取 3 个点, 取施肥穴底部面向橡胶树的侧壁深度 40~60 cm 土壤样品 500 g 左右, 将样本置于阴凉处风干, 磨碎过 2 mm 筛, 备用。

(2) 根系: 各处理施肥区随机选取 3 个点, 取施肥穴底部面向橡胶树的侧壁深度 40~60 cm 土壤中直径小于 2 mm 的橡胶树吸收根系, 用去离子水洗涤后杀青、烘干, 磨成粉末。

(3) 叶片: 各处理施肥区随机选取 5 株植株, 采集 30 片稳定的第 2 蓬叶作为样本, 用去离子水洗涤后杀青、烘干, 磨成粉末。

(4) 胶乳和生胶: 割胶 3 h 后开始收集胶乳样品, 采集 9 株橡胶树的胶乳混匀, 取 10 g 左右直接烘干为总固形物, 加 2 mL 5% 乙酸摇匀, 泡水 3 d 再烘干, 用于测量干胶含量, 剩余胶乳加入 5% 乙酸摇匀, 经过机械压制制作生胶片。

1.2.3 指标测定 采用 Tessier 五步连续提取法分析土壤中 Mn 各形态组分含量, 采用电位法测定土壤 pH。参考 GB/T 33324—2016 的方法测定橡胶根、叶片、胶乳、生胶中的 Mn 含量。参考 GB/T 3510—2006 的方法测定生胶塑性初值 (P_0), 参考 GB/T 3517—2014 的方法测定生胶塑性保持率 (PRI), 参考 GB/T1232.1—2016 的方法测定生胶门尼黏度 (Mv), 使用美国 Agilent 公司生产的 Agilent 100 型凝胶渗透色谱仪测定橡胶分子量分布。

1.3 数据处理

应用 SPSS 26.0 软件进行数据整理与分析, 采用 Duncan's 法进行多重比较 ($P<0.05$), 使用 Origin 2021 Pro 软件绘制图表及进行线性回归相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对橡胶树干胶产量指标的影响

干胶产量是反映橡胶树产能的重要指标, 总固形物含量和干胶含量是影响橡胶树产量和品质的重要指标。由表 2 可知, 不同处理橡胶树单刀单株干胶产量在 44.96~62.90 g 之间, T_5 处理较 T_2 处理有显著增加, 但各施肥处理与 CK 相比无显著差异。不同处理总固形物含量在 35.86%~37.34%之间, 干胶含量在 31.05%~32.74%之间,

表 1 不同施肥处理及施肥方式

Tab. 1 Different fertilization treatments and methods

编号 No.	单株年施肥量 Annual fertilization rate per plant	施肥方式 Fertilization method
CK	不施肥	
T_1	2 kg 硅酸钠	穴施
T_2	0.5% 锌钼肥	剖面涂施
T_3	5 kg 生物炭	穴施
T_4	5 kg 生物炭+0.5% 锌钼肥	穴施+剖面涂施
T_5	5 kg 生物炭+0.5% 锌钼肥+2 kg 硅酸钠	穴施+剖面涂施

表 2 不同施肥处理的干胶产量和胶乳浓度

Tab. 2 Dry rubber yield and latex concentration under different fertilization treatments

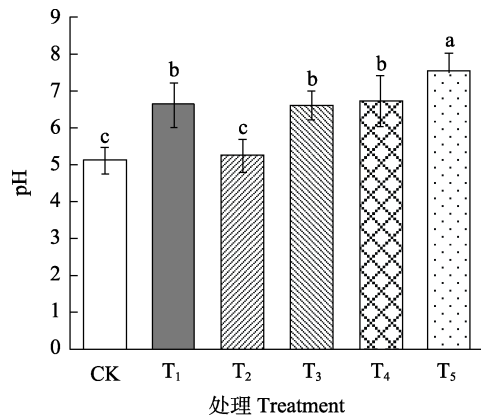
处理 Treatment	单株干胶产量 Dry rubber yield of per plant		总固形物 Total solids		干胶 Dry rubber	
	单株产量 Yield of per plant/g	相对增幅 Relative increase/%	含量 Content/%	相对增幅 Relative increase/%	含量 Content/%	相对增幅 Relative increase/%
CK	48.39±11.56 ^{ab}		35.86±4.58 ^a		31.05±4.84 ^a	
T ₁	51.09±18.31 ^{ab}	5.58	36.51±3.90 ^a	1.81	32.22±4.69 ^a	3.77
T ₂	44.96±15.22 ^b	-7.09	35.98±4.56 ^a	0.33	32.25±5.87 ^a	3.86
T ₃	57.59±18.73 ^{ab}	19.01	36.80±4.48 ^a	2.62	32.34±5.17 ^a	4.15
T ₄	54.33±23.05 ^{ab}	12.28	37.34±5.20 ^a	4.13	31.58±5.37 ^a	1.71
T ₅	62.90±18.47 ^a	29.99	36.53±5.02 ^a	1.87	32.74±7.19 ^a	5.44

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

各处理的总固形物和干胶含量均无显著差异。

2.2 不同施肥处理对土壤和橡胶树各器官 Mn 含量的影响

2.2.1 土壤 pH pH 是土壤重要指标之一，与土壤理化性质和金属离子形态有密切关系^[18]。如图 1 所示，与 CK（pH 5.12）相比，T₁、T₃、T₄、T₅ 处理均显著提高土壤 pH，其中 T₅ 处理的 pH 提高了 2.41，达到 7.53。由此可见，施用硅酸钠和生物炭均能显著提高土壤 pH，二者组合施用效果更好。



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 不同施肥处理的土壤 pH
Fig. 1 Soil pH values under different fertilization treatments

2.2.2 土壤不同形态 Mn 含量的变化 土壤中的金属形态及其植物有效性直接影响作物对金属元素的吸收^[19]。不同施肥处理土壤中不同形态的 Mn 含量如图 2 所示，与 CK 相比，各施肥处理的土壤 Mn 可交换态含量均有所降低。通常可交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态是容易被

植物利用的 Mn 形态，CK 中这 3 种形态的 Mn 含量之和占比为 57.2%，T₁、T₄ 和 T₅ 处理的这 3 种形态的 Mn 含量之和分别降低至 51.2%、48.3%和 52.3%。而从残余态 Mn 含量来看，与 CK（42.1%）相比，T₁、T₄ 和 T₅ 处理的残余态 Mn 分别增加至 48.3%、51.0%和 47.1%。

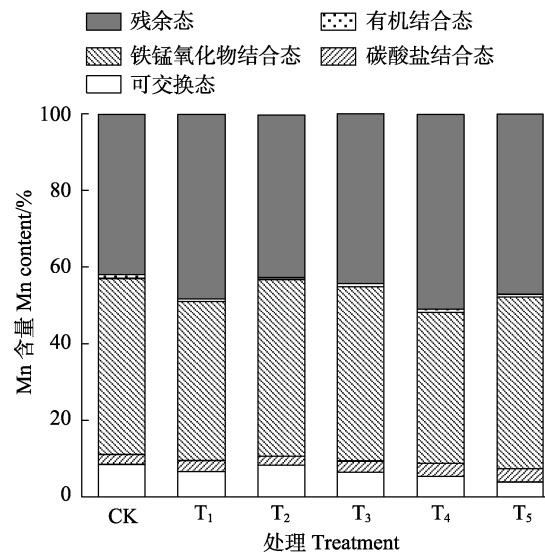


图 2 不同施肥处理土壤中的不同形态 Mn 含量
Fig. 2 Content of different forms of Mn in soil under various fertilization treatments

2.2.3 橡胶树根系、叶片、胶乳和生胶中 Mn 含量的变化 不同施肥处理下各目标样品中的 Mn 含量如表 3 所示，在根系的 Mn 含量中，与 CK 相比，T₃、T₄、T₅ 处理的 Mn 含量显著降低，降幅分别为 40.77%、48.81%、48.72%；在叶片的 Mn 含量中，与 CK 相比，T₃、T₄、T₅ 处理的 Mn 含量均显著增加，增幅分别为 89.87%、91.88%、81.41%，其中 T₄ 处理的 Mn 含量最高为 130.69 mg/kg；各处理的胶乳 Mn 含量在 0.75~1.30 mg/kg 之间，其中

表 3 不同施肥处理橡胶树各部位、
胶乳及生胶的 Mn 含量

Tab. 3 Mn content of rubber tree parts, latex and raw rubber under different fertilization treatments

处理 Treat ment	Mn 含量 Mn Content/(mg·kg ⁻¹)			
	根系 Root	叶片 Leaf	胶乳 Latex	生胶 Raw rubber
CK	88.37±19.82 ^{ab}	68.11±11.92 ^b	1.30±0.31 ^a	0.66±0.31 ^a
T ₁	74.05±22.84 ^b	95.99±60.75 ^{ab}	1.09±0.12 ^{ab}	0.58±0.11 ^a
T ₂	93.91±22.64 ^a	73.41±17.41 ^b	1.26±0.31 ^{ab}	0.65±0.35 ^a
T ₃	52.34±14.48 ^c	129.32±40.02 ^a	0.99±0.13 ^{ab}	0.63±0.20 ^a
T ₄	45.24±7.54 ^c	130.69±35.70 ^a	0.80±0.27 ^b	0.56±0.15 ^a
T ₅	45.32±8.71 ^c	123.56±21.46 ^a	0.75±0.16 ^b	0.51±0.12 ^a

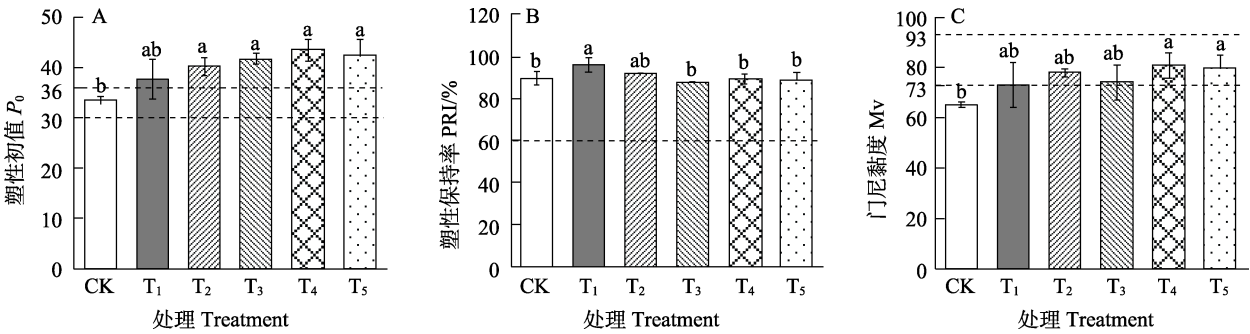
注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

T₄、T₅ 处理较 CK 显著降低，降幅分别为 38.46% 和 42.31%；各处理的生胶 Mn 含量在 0.51~0.66 mg/kg 之间，不同施肥处理均有所下降，但无显著差异。综上所述，T₃、T₄、T₅ 处理能显著降低根系的 Mn 含量，而提高叶片的 Mn 含量，T₄、T₅ 处理能显著降低胶乳 Mn 含量，各施肥处理的生胶 Mn 含量无显著差异。

2.3 不同施肥处理对生胶分子量和性能指标的影响

2.3.1 生胶性能指标的变化 塑性初值（ P_0 ）是



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 不同施肥处理的生胶性能

Fig. 3 Properties of raw rubber under different fertilization treatments

2.3.2 生胶分子量及分子量分布的变化 橡胶分子量反映橡胶分子的分散程度，低分子量的部分与高分子量的部分分别对数均分子量（MN）与重均分子量（MW）有较大影响，由于天然橡胶的分子量存在分布不均或多分散的现象，因此以分子量分布的宽度系数（MW/MN）表示分散程度，

指生胶在一定温度和压力下的初始塑性特征；门尼黏度（Mv）是表征特定温度下测量生胶流动性的指标，越高的门尼黏度意味着橡胶越黏稠；塑性保持率（PRI）表示经过一段时间老化后的塑性保持能力，一般用来评价生胶的抗氧化性能。由图 3A 可知，T₂、T₃、T₄、T₅ 处理的塑性初值显著高于 CK，增幅分别为 20.15%、24.63%、29.85%、26.87%。且不同施肥处理后的生胶均符合 GB/T 8081—2018 中天然生胶 $P_0\geq 30$ 和 GJB 7269—2011 航空轮胎用天然橡胶通用规范中 $P_0\geq 36$ 的标准。塑性保持率方面（图 3B），与 CK 相比，T₁ 处理的塑性保持率有显著提高，增幅为 7.13%，其他处理较 CK 无显著差异，但所有处理的塑性保持率均达到 GB/T 8081—2018 中 $PRI\geq 60$ 和 GJB 7269—2011 中 $PRI\geq 60$ 的标准。在门尼黏度方面（图 3C），与 CK 相比，T₄、T₅ 处理的门尼黏度有显著提高，增幅分别为 23.85%和 21.93%，T₂、T₃、T₄、T₅ 处理的生胶门尼黏度均达到 GJB 7269—2011 中 $73\leq$ 门尼黏度 ≤ 93 的标准。综上所述，T₁ 处理对提高生胶塑性保持率效果较好，T₂、T₃、T₄、T₅ 处理提高了生胶塑性初值，T₄、T₅ 处理能提高生胶门尼黏度，并且 T₂、T₃、T₄、T₅ 处理的生胶塑性初值、塑性保持率、门尼黏度均符合航空轮胎用天然橡胶通用规范。

MW/MN 值越大表示分子量分布范围越宽，反之越窄。如表 4 所示，不同处理的生胶数均分子量在 $35.25\times 10^4\sim 39.57\times 10^4$ 之间，重均分子量在 $161.84\times 10^4\sim 167.32\times 10^4$ 之间，各处理间均无显著差异。在分子量分布的宽度系数方面，与 CK 相比，各施肥处理均降低了分子量分散程度。

表 4 不同施肥处理的生胶分子量及分子量分布
Tab. 4 Molecular weight and distribution of raw rubber under different fertilization treatments

处理 Treatment	数均 分子量 MN/×10 ⁴	MN 相对 增幅 Relative increase of MN/%	重均 分子量 MW/×10 ⁴	MW 相对 增幅 Relative increase of MW/%	MW /MN
CK	35.25 ^a		161.84 ^a		4.64
T ₁	36.95 ^a	4.84	164.37 ^a	1.56	4.47
T ₂	38.15 ^a	8.24	167.32 ^a	3.39	4.39
T ₃	39.57 ^a	12.27	166.38 ^a	2.80	4.28
T ₄	36.35 ^a	3.13	165.22 ^a	2.09	4.58
T ₅	36.62 ^a	3.91	163.72 ^a	1.16	4.49

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.4 胶乳和生胶的 Mn 含量与生胶性能的相关性

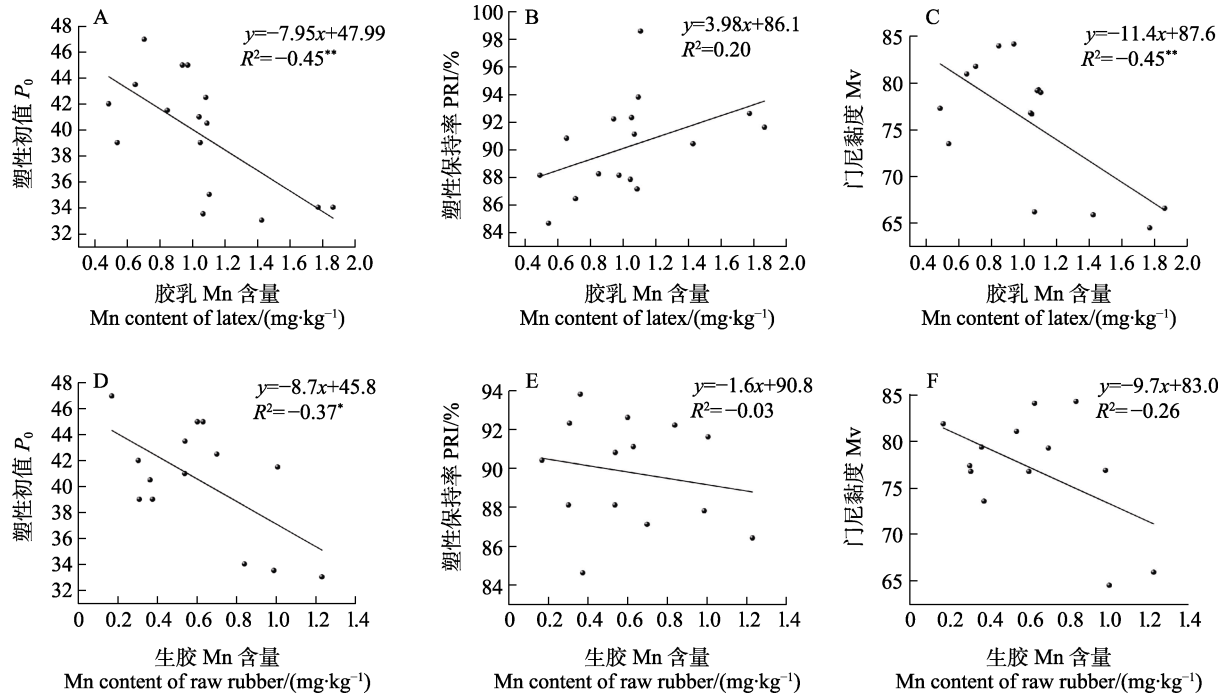
通过相关性与回归分析表明，胶乳 Mn 含量与生胶塑性初值呈极显著负相关，胶乳 Mn 含量每降低 1 mg/kg，生胶塑性初值增加 7.95(图 4A)；生胶塑性保持率随着胶乳 Mn 含量的增加而增加，但相关性未达显著水平（图 4B）；胶乳 Mn 含量与生胶门尼黏度呈极显著负相关，胶乳 Mn 含量每降低 1 mg/kg，生胶门尼黏度增加 11.4(图 4C)。

在生胶 Mn 含量方面，生胶 Mn 含量与生胶塑性初值呈显著负相关，生胶 Mn 含量每降低 1 mg/kg，生胶塑性初值增加 8.7(图 4D)；生胶 Mn 含量与生胶塑性保持率、门尼黏度均呈负相关，但相关性未达到显著水平（图 4E、图 4F）。结果表明，降低胶乳 Mn 含量能显著提高生胶塑性初值和门尼黏度，同时会降低塑性保持率，降低生胶 Mn 含量能显著提高生胶塑性初值，同时有利于提高生胶塑性保持率和门尼黏度。

3 讨论

3.1 复合施肥对橡胶树胶乳产量的影响

干胶产量、总固形物含量和干胶含量是构成橡胶产量的重要指标。本研究发现，单施生物炭和生物炭配施锌铝肥与硅肥处理对橡胶树的干胶产量、总固形物和干胶含量有一定影响。其原因可能是生物炭中含有大量的矿质养分、丰富的有机官能团、较高的比表面积和阳离子交换量、疏松多孔结构等特性^[20]，将生物炭添加至土壤中，可提高土壤碳库，降低土壤酸度，提升土壤 pH。黄超等^[21]研究发现，在肥力水平较低的土壤中，速效磷、速效钾和有效氮均随生物炭施用量的增



*表示显著相关（ $P<0.05$ ）；**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
* indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 4 胶乳和生胶的 Mn 含量与生胶性能的相关性

Fig. 4 Correlation between latex and raw rubber Mn content and the properties of raw rubber

加而提高,同时提高了土壤水稳定性团聚体数量,从而增强土壤保肥能力,改善植物生长环境和营养供给,在生物炭添加量为 200 g/kg 时,黑麦草产量增加 53%。ZHANG 等^[22]研究发现,施用生物炭提高了水稻生物量和产量;硅酸钠的施用可提高土壤 pH,减轻污染土壤中重金属对植物生长的毒害^[23],增强植物对生物和非生物胁迫的抵抗能力^[24]。TIAN 等^[25]研究发现,适量添加硅酸钠能促进植物对养分的吸收和利用。

3.2 复合施肥对土壤-橡胶树系统各部位 Mn 含量的影响

本研究表明,配施生物炭和硅酸钠能提高土壤 pH,减少土壤中可交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Mn 含量,增加残余态 Mn 含量,使易被植物利用的 Mn 形态转化为难被利用的形态,从而降低了 Mn 的有效性和流动性。由于锌钼肥涂施在割面上,对土壤 pH 的影响不显著,且割面涂施 0.5% 锌钼肥处理对土壤中的可交换态和碳酸盐结合态 Mn 含量影响较小。土壤 pH 与重金属的化学形态及重金属的迁移具有显著的相关性^[26]。已有研究发现,植物通过根系从土壤中吸收金属元素,所吸收的金属元素总量主要受元素的化学形态的影响^[27]。

Mn 是参与植物新陈代谢的必需营养元素之一,对植物的光合作用有重要影响^[28];植物对金属元素的吸收与土壤中金属元素的生物有效性存在较强的相关性^[19]。本研究发现,施用生物炭和硅酸钠降低了土壤中可交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Mn 的总含量,减少了土壤中植物可利用的 Mn 含量,从而降低了橡胶树根系中的 Mn 含量。同时,与 CK 相比, T₄、T₅ 处理的胶乳中 Mn 含量显著降低,可能是因为生物炭与锌钼肥以及硅酸钠配施增强了土壤对 Mn 的固定,减少了橡胶树对 Mn 的吸收,使转运到胶乳中的 Mn 含量降低。另外,因为 T₄、T₅ 处理的干胶产量有少量增加,可能会导致胶乳中 Mn 出现“稀释效应”,从而呈现出 Mn 含量显著降低的趋势。孙蕊卿等^[29]研究发现,高产量区的小麦受“稀释效应”的影响,籽粒和面粉 Fe 含量有所降低。前人研究表明, Zn 元素可通过拮抗作用抑制有毒元素在植物体内的累积,且已证实 Mo 元素与 Mn 之间亦存在拮抗作用^[30-31]。本研究中的涂施锌钼肥处理下,根系、叶片、胶乳中的 Mn 含量无明

显变化,其影响效果还有待进一步开展研究。

3.3 复合施肥对生胶性能的影响

门尼黏度大小主要受到生胶非胶组分和分子量大小的影响^[32], P₀ 反映天然橡胶可塑性的好坏, P₀ 的大小与天然橡胶分子量有关, P₀ 越大,橡胶的相对分子量也大,生胶在贮存、加工过程中变异性就越小。PRI 反映橡胶耐老化性能,可用于评估天然生胶耐氧化程度, PRI 愈高,生胶的耐热老化性能越好^[33]。本研究表明, T₂、T₃、T₄、T₅ 处理的生胶能提高塑性初值, T₄、T₅ 处理能提高门尼黏度;由于胶乳和生胶 Mn 含量与生胶塑性初值和门尼黏度均呈负相关,因此可能是减少了胶乳和生胶 Mn 等非胶组分含量,进而提高了橡胶分子量而影响了生胶的塑性初值和门尼黏度。硅酸钠处理能提高生胶塑性保持率,可能是施用硅酸钠减轻了污染土壤中金属对植物生长毒害的影响^[34],降低了生胶中 Mn 等非胶组分含量,提高了生胶的塑性保持率,但仍需进一步验证。

4 结论

合理进行生物炭、硅酸钠和锌钼肥的配施能改善胶园土壤环境,影响橡胶树的干胶产量,同时能降低胶乳中的 Mn 含量,改善生胶性能。研究发现, 0.5% 锌钼肥 (T₂)、5 kg 生物炭 (T₃)、5 kg 生物炭+0.5% 锌钼肥 (T₄) 和 5 kg 生物炭+0.5% 锌钼肥+2 kg 硅酸钠 (T₅) 4 种施肥措施均能使生胶性能达到航空轮胎用天然橡胶通用规范 (GJB 7269—2011)。在海南热带砖红壤地区,施用 5 kg 生物炭+0.5% 锌钼肥或 5 kg 生物炭+0.5% 锌钼肥+2 kg 硅酸钠对综合提高橡胶树干胶产量、生胶塑性初值、门尼黏度等具有较好效果。

参考文献

- [1] 洪群联. 后疫情时代中国产业发展与橡胶行业走势建议[J]. 中国橡胶, 2023, 39(3): 28-30.
HONG Q L. Suggestions on the development of China's industry and rubber industry trends in the post-pandemic era[J]. China Rubber, 2023, 39(3): 28-30. (in Chinese)
- [2] 何映平. 天然橡胶加工学[M]. 海口: 海南出版社, 2007.
HE Y P. Natural rubber processing[M]. Haikou: Hainan Publishing House, 2007. (in Chinese)
- [3] WANG Y, HOLLINGSWORTH P M, ZHAI D, WEST C D, GREEN J M H, CHEN H, HURNI K, SU Y, WARRENTHOMAS E, XU J, AHREND S A. High-resolution maps

- show that rubber causes substantial deforestation[J]. *Nature*, 2023, 623(7986): 340-346.
- [4] 刘锐金, 何长辉, 刘东, 黄华孙. 持续推进天然橡胶生产保护区工作的思考[J]. *中国热带农业*, 2022(4): 12-21.
LIU R J, HE C H, LIU D, HUANG H S. Reflections on the continued promotion of natural rubber production protection zone work[J]. *China Tropical Agriculture*, 2022(4): 12-21. (in Chinese)
- [5] 罗富晟, 王媛媛, 张德生. 海南特色产业精准扶贫的实践与思考——基于天然橡胶产业视角[J]. *中国热带农业*, 2018(4): 8-11.
LUO F S, WANG Y Y, ZHANG D S. Practice and reflection on precision poverty alleviation for Hainan's specialty industries: based on the natural rubber industry perspective[J]. *China Tropical Agriculture*, 2018(4): 8-11. (in Chinese)
- [6] 郭煜雯, 赵帅, 鲍柯旭, 韩冬仁, 吴晓辉, 韩冬礼, 张振翀, 张继川. 非胶组分对天然橡胶性能的影响研究[J]. *橡胶工业*, 2024, 71(7): 483-493.
GUO Y W, ZHAO S, BAO K X, HAN D R, WU X H, HAN D L, ZHANG Z C, ZHANG J C. Study on the effect of non-rubber components on the properties of natural rubber[J]. *Rubber Industry*, 2024, 71(7): 483-493. (in Chinese)
- [7] 袁天元. 金属离子对天然橡胶老化性能影响的研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
YUAN T Y. Study on the influence of metal ions on the aging properties of natural rubber[D]. Haikou: Hainan University, 2017. (in Chinese)
- [8] 吕明哲, 黄茂芳, 陈美, 陈成海. 金属离子对不同品系天然橡胶热稳定性的影响[C]. 中国热带作物学会 2007 年学术年会论文集, 2007: 4.
LYU M Z, HUANG M F, CHEN M, CHEN C H. Effect of metal ions on the thermal stability of different natural rubber clones[C]. The Proceedings of the 2007 Annual Academic Conference of the Chinese Society of Tropical Crops, 2007: 4. (in Chinese)
- [9] 杨娇, 信秀丽, 钟新月, 丁世杰, 张先凤, 任国翠, 朱安宁. 长期不同施肥对潮土磷素吸附特征的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 1047-1057.
YANG J, XIN X L, ZHONG X Y, DING S J, ZHANG X F, REN G C, ZHU A N. Effect of long-term different fertilizations on phosphorus adsorption characteristics in gley soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(4): 1047-1057. (in Chinese)
- [10] 王晓琦, 唐琦, 黄一帆, 林丽娜, 邹洪涛, 宋正国. 两种生物炭对污染土壤铜有效性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(4): 361-368.
WANG X Q, TANG Q, HUANG Y F, LIN L N, ZOU H T, SONG Z G. Effects of two types of biochar on copper availability in contaminated soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(4): 361-368. (in Chinese)
- [11] 刘冲, 刘晓文, 吴文成, 蔡信德, 梁啸, 李云标, 南忠仁. 生物炭及炭基肥对油菜生长及吸收重金属的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10): 3064-3070.
LIU C, LIU X W, WU W C, CAI X D, LIANG X, LI Y B, NAN Z R. Effects of biochar and charcoal-based fertilizer on growth of oilseed lettuce and heavy metal absorption[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10): 3064-3070. (in Chinese)
- [12] 黄宗鸿, 高利坤, 王鹏, 马方通. 硅缓解植物重金属胁迫的主要机理[J]. *湖南农业科学*, 2017(6): 122-126.
HUANG Z H, GAO L K, WANG P, MA F T. Major mechanisms of silicon in alleviating heavy metal stress in plants[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(6): 122-126. (in Chinese)
- [13] 黄巧云, 李学垣, 胡红青. 硅对酸性土壤铝毒的缓解作用[J]. *环境科学*, 1995(6): 11-13, 91-92.
HUANG Q Y, LI X Y, HU H Q. Alleviating effect of silicon on aluminum toxicity in acidic soils[J]. *Environmental Science*, 1995(6): 11-13, 91-92. (in Chinese)
- [14] 任利娟, 卢维宏, 李嘉琦, 于畅, 于泓, 包立, 张乃明. 叶面阻控剂在重金属污染耕地土壤安全利用中的应用[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(11): 230-236.
REN L J, LU W H, LI J Q, YU C, YU H, BAO L, ZHANG N M. Application of foliar growth regulators in safe utilization of heavy metal contaminated cultivated soil[J]. *China Soil and Fertilizer*, 2022(11): 230-236. (in Chinese)
- [15] 李广鑫, 赵鹏, 睢福庆, 刘红恩, 秦世玉, 段然, 杨艳征, 王云, 李畅. 螯合-缓冲营养液培养条件下添加外源锌对小麦幼苗生长和 *TaZIPs* 基因表达的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(3): 470-481.
LI G X, ZHAO P, SUI F Q, LIU H E, QIN S Y, DUAN R, YANG Y Z, WANG Y, LI C. Effect of exogenous zinc addition on wheat seedling growth and *TaZIPs* gene expression under chelate-buffer nutrient solution conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(3): 470-481. (in Chinese)
- [16] 代晶晶, 徐应明, 王林, 李然, 孙约兵, 梁学峰. 不同锌营养下喷施锌肥对油菜生长和元素含量的影响[J]. *环境化学*, 2017, 36(5): 1017-1025.
DAI J J, XU Y M, WANG L, LI R, SUN Y B, LIANG X F. Effects of zinc fertilizer application on rapeseed growth and element content under different zinc nutritional conditions[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(5): 1017-1025. (in Chinese)
- [17] 张梓良, 王雅洁, 石磊. 华中农业大学校园被子植物叶片

- 离子组学研究[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(6): 138-146.
- ZHANG Z L, WANG Y J, SHI L. Study on leaf ionomics of dicotyledonous plants on the campus of Huazhong Agricultural University[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(6): 138-146. (in Chinese)
- [18] 凌云, 刘汉焱, 张小婷, 魏世强. 西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 376-386.
- LING Y, LIU H Y, ZHANG X T, WEI S Q. Characteristics of soil acidification and its coupling relationship with the active forms of heavy metals in typical soils in Southwest China[J]. Environmental Science, 2023, 44(1): 376-386. (in Chinese)
- [19] 杨晓磊, 陆萍, 张蓉, 朱恩, 饶燕敏. 蔬菜大棚土壤重金属有效态几种修复方法[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(2): 239-242.
- YANG X L, LU P, ZHANG R, ZHU E, RAO Y M. Methods for remediation of bioavailable heavy metals in vegetable greenhouse soils[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(2): 239-242. (in Chinese)
- [20] 侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹. 椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中 Pb 钝化的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4497-4506.
- HOU Z W, LI J H, LI C S, ZHANG J M, LIN Q H, ZHAO Q J, WU Z P, WANG Y. Effects of coconut fiber biochar and its nitrate modification on Pb immobilization in paddy soil[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4497-4506. (in Chinese)
- [21] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 439-445.
- HUANG C, LIU L J, ZHANG M K. Influence of biomass charcoal on red soil properties and growth of lolium perenne[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2011, 37(4): 439-445. (in Chinese)
- [22] ZHANG J M, LI J H, LIN Q H, HUANG Y Y, CHEN D L, MA H Y, ZHAO Q J, LUO W, NAWAZ M, JEYAKUMAR P, TRAKAL L, WANG H L. Impact of coconut-fiber biochar on lead translocation, accumulation, and detoxification mechanisms in a soil-rice system under elevated lead stress[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 469: 133903.
- [23] CHEN H M, ZHENG C R, TU C, SHEN Z G. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals[J]. Chemosphere, 2000, 41(1/2): 229-234.
- [24] SAVANT N K, SNYDER G H, DATNOFF L E. Silicon management and sustainable rice production[J]. Advances in Agronomy, 1996, 58: 151-199.
- [25] TIAN W, LI Z X, GONG K X, WANG X D, SHAH S, WANG X Z, ZHANG X Y. Sodium silicate improves cucumber seedling growth and substrate nutrients and reduces heavy metal accumulation in plants[J]. Horticulturae, 2023, 9(9): 988.
- [26] 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 罗克洁. 土壤 pH 值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(6): 79-83.
- YANG X M, REN G M, LI L X, LUO K J. Influence of soil pH on heavy metal speciation and its correlation[J]. China Mining, 2017, 26(6): 79-83. (in Chinese)
- [27] 李振炫, 杨钰莹, 董蓓, 胡鹏杰, 吴龙华, 骆永明. 伴矿景天植物汁液还田对土壤重金属形态及植物吸收的影响[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(3): 449-455.
- LI Z X, YANG Y Y, DONG B, HU P J, WU L H, LUO Y M. Effects of companion plant juice returning to soil on heavy metal speciation and plant uptake[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(3): 449-455. (in Chinese)
- [28] MAHJOUBI Y, RZIGUI T, BEN MASSOUD M, KHARB-ECH O, LOUSSAIEF N, CHAOUI A, DJEBALI W. Leaf gas exchange of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings subjected to manganese stress[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2020, 67: 168-174.
- [29] 孙蕊卿, 党海燕, 余文婷, 王星舒, 褚宏欣, 王涛, 丁玉兰, 徐隽峰, 王朝辉. 我国主要麦区小麦籽粒和面粉铁含量的影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(4): 627-640.
- SUN R Q, DANG H Y, SHE W T, WANG X S, CHU H X, WANG T, DING Y L, XU J F, WANG Z H. Factors affecting iron content in wheat grains and flour in major wheat growing areas of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(4): 627-640. (in Chinese)
- [30] 王佳炜, 程楠, 王训. 微量元素钼的生理作用及其对机体功能的影响研究进展[J]. 医学综述, 2013, 19(19): 3460-3463.
- WANG J W, CHENG N, WANG X. Research progress on physiological functions of trace element molybdenum and its influence on organism function[J]. Medical Review, 2013, 19(19): 3460-3463. (in Chinese)
- [31] 阳树英, 邹应斌, 夏冰, 吴朝晖, 周婷, 陈逸. 中国传统地方香稻品种资源的多样性及其在特殊生境成香机理的探讨[J]. 中国稻米, 2015, 21(3): 1-7.
- YANG S Y, ZOU Y B, XIA B, WU Z H, ZHOU T, CHEN Y. Diversity of traditional local fragrant rice varieties in China and the mechanism of aroma formation in special

- habitats[J]. *China Rice*, 2015, 21(3): 1-7. (in Chinese)
- [32] 曾宗强, 陈美, 张北龙, 吕明哲, 黄华明. 橡胶树品种及凝固工艺对天然橡胶性能的影响[J]. *热带农业科技*, 2008, 31(3): 9-12.
- ZENG Z Q, CHEN M, ZHANG B L, LYU M Z, HUANG H M. Effect of rubber tree varieties and coagulation processes on the properties of natural rubber[J]. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 2008, 31(3): 9-12. (in Chinese)
- [33] 廖小雪. 橡胶树品系、树龄及割胶方式对天然橡胶性能影响的研究[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- LIAO X X. Study on the influence of rubber tree varieties, age, and tapping methods on the properties of natural rubber[D]. Haikou: Hainan University, 2022. (in Chinese)
- [34] SHIM J, SHEA P J, OH B T. Stabilization of heavy metals in mining site soil with silica extracted from corn cob[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225: 1-12.