

微肥与促吸收剂配施对橡胶树幼苗生长以及光合作用和氮代谢的影响

任常琦^{1,2}, 张永发^{1,2}, 罗雪华^{1,2}, 薛欣欣^{1,2}, 赵春梅^{1,2}, 王文斌^{1,2*}

1. 中国热带农业科学院橡胶研究所/土壤肥料研究中心, 海南海口 571101; 2. 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: 橡胶树是全球重要的热带、亚热带经济林。为揭示微肥与促吸收剂配施对橡胶树幼苗生长的影响, 以期为橡胶树微肥施用技术创新奠定基础。本研究以单施微肥 (W)、促吸收剂配方 1 与微肥配施 (C₁+W)、促吸收剂配方 2 与微肥配施 (C₂+W) 为处理, 探讨微肥单施或与促吸收剂配施对橡胶树幼苗生长、干物质累积、光合作用、根系发育和氮素分配等影响及作用机制。结果显示: 微肥能提高橡胶树幼苗根、茎、叶的干物质累积, 进而提升其单株鲜重、干重、干鲜比。其中, C₂+W 处理可使植株鲜重和干重增加 4.18 倍和 5.89 倍, 远大于 C₁+W 和 W 处理。同时, 微肥对橡胶树幼苗的干物质累积量与根长、根表面积、根体积呈正相关, 也与橡胶树幼苗的叶绿素含量、蒸腾速率 (T_r)、净光合速率 (P_n) 呈正相关。根系发育和光合作用与植株各器官氮积累量、叶片可溶性蛋白 (SP) 含量、硝酸还原酶 (NR) 活性、谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性、谷氨酸脱氢酶 (GDH) 活性呈正相关。单施微肥对 NR 活性影响不显著, 表明 W 处理对硝酸还原成亚硝酸的氮同化作用微弱。总而言之, 微肥与促吸收剂配施强化了橡胶树幼苗的 C 同化和 N 代谢过程的联系, 共同促进了橡胶树幼苗的生长发育。考虑到橡胶树叶片宽厚、细胞紧密、角质层厚, 后续研究应继续筛选更合适的促吸收剂, 并优化其与微肥的搭配。

关键词: 橡胶树幼苗; 微肥; 促吸收剂; 根系发育; 光合作用; 氮代谢

中图分类号: S794.1; S145.2 文献标志码: A

Effects of Microelements Fertilizer Combined with Absorption Enhancer on Growth, Photosynthesis and Nitrogen Metabolism of Rubber Seedlings

REN Changqi^{1,2}, ZHANG Yongfa^{1,2}, LUO Xuehua^{1,2}, XUE Xinxin^{1,2}, ZHAO Chunmei^{1,2}, WANG Wenbin^{1,2*}

Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Soil and Fertilizer Research Center, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Danzhou Soil Environment of Rubber Plantation, Hainan Observation and Research Station, Danzhou, Hainan 571737, China

Abstract: Rubber tree is important in global rubber production. In order to reveal the effects of microelement fertilizer combined with absorption enhancer on the growth of rubber tree seedlings, and lay a foundation for the innovation of microelement fertilizer application technology of rubber tree. In this study, the single application of microelement (W), the combination of absorption enhancer formula 1 and microelement fertilizer (C₁+W), and the combination of absorption enhancer formula 1 and microelement fertilizer (C₂+W) were treated with ultra-pure water as the control to investigate the effects of compound microelement fertilizer application alone or combined with absorption enhancer on the growth, dry matter accumulation, photosynthesis, root development and nitrogen distribution of rubber tree seedlings and their mechanisms. The results showed that micronutrient fertilizer could increase the dry matter accumulation of

收稿日期 2023-10-11; 修回日期 2023-10-30

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 421QN337, No. 323RC528); 国家重点研发计划项目 (No. 2020YFD1001200)。

作者简介 任常琦 (1991—), 女, 硕士, 研究实习生, 研究方向: 土壤养分管理。*通信作者 (Corresponding author): 王文斌 (WANG Wenbin), E-mail: mywwb@163.com。

roots, stems, and leaves in rubber seedlings, thereby increasing the individual fresh weight, dry weight, and dry to fresh ratio. Among them, C₂+W increased the fresh and dry weight of plants by 4.18 and 5.89 times, which is much greater than those of C₁+W and W. The accumulation of dry matter in rubber seedlings by microelements fertilizers was positively correlated with root length, root surface area, and root volume, and with chlorophyll content, transpiration rate, and net photosynthetic rate of rubber seedlings. The root development and photosynthesis were positively correlated with nitrogen accumulation in various organs of crops, soluble protein content, nitrate reductase activity (NR), glutamine synthase activity (GS), and glutamate dehydrogenase activity (GDH) in leaves. Notably, the single application of microelements fertilizer had no significant effect on NR activity, indicating that W had a weak effect on nitrogen assimilation in the reduction of nitric acid to nitrite. Significantly, the single application of microelements fertilizer (W) had no significant effect on NR activity, indicating that microelements fertilizer had a weak effect on nitrogen assimilation in the reduction of nitric acid to nitrite. In summary, microelements fertilizers and absorption enhancer enhance the connection between C assimilation and N metabolism processes in rubber seedlings, promote the growth and development of rubber seedlings. Considering the wide and thick leaves of rubber, tight cells, and thick stratum corneum, subsequent research should continue to screen more suitable absorption enhancer and optimize the combination with microelements.

Keywords: rubber seedlings; microelements fertilizer; absorption enhancer; root development; photosynthesis; nitrogen metabolism

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.07.013

橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 是热带、亚热带地区种植面积大、经济效益好的一种乔木, 广泛种植于全球 40 多个国家和地区^[1-2]。我国植胶区主要分布在海南省、云南省西双版纳、广东省粤西等地区, 面积达 116.1 万 hm², 位居世界第三^[3]。天然橡胶是橡胶树体内合成的一种以顺-1,4-聚异戊二烯为主要成分的天然高分子化合物^[4]。长期以来, 天然橡胶由于其优异的耐磨、耐酸碱、耐热等性能, 被广泛应用于航天、军工、民用领域, 对社会经济发展与国防建设起着至关重要的作用^[3-5]。因此, 我国高度重视橡胶树的种植和天然橡胶生产。

施肥是维持橡胶树稳产高产的重要举措^[3]。研究发现, 合理施用氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 肥可促进橡胶树快速生长、提高产胶能力^[6-7]。尤其是氮肥, 可影响橡胶树器官的分化、形成及建造。然而, 少有研究揭示硼 (B)、锌 (Zn)、钼 (Mo)、铁 (Fe)、锰 (Mn) 等微量元素肥料 (微肥) 对橡胶树生长的影响^[8]。事实上, 微肥对植物的生长发育与大量元素肥料同等重要。如 Fe 是合成叶绿素的必需元素, 直接影响光合作用和生物量合成^[9]; Mn 是维持叶绿体结构的必需微量元素, 在叶绿体中可与蛋白质结合形成酶蛋白, 参与光合作用、调控植物氮代谢过程^[8-9]。因此, 微肥在农业生产中被广泛使用。目前, 由于微肥易被土壤固定而影响有效性, 其大多采用叶面喷施方式^[10]。微肥的肥效还与叶片性质相关。鉴于橡胶树叶片宽厚、细胞排列紧密、角质层厚的特

点^[11], 微肥在橡胶树的种植应用中, 应充分考虑与促吸收剂 (如辛基葡糖苷、甘露醇等) 联合施用, 以提高微肥叶面穿透性和养分利用效率。然而, 迄今为止, 未有相关报道。

微肥的使用, 不但可增强作物微量元素的营养水平, 对大量元素的吸收利用也有促进作用, 尤其是 N^[10, 12]。研究表明, 微肥叶面喷施能显著提高作物的硝酸还原酶, 谷氨酰胺合成酶等 N 代谢相关酶活性, 增加 N 吸收^[13]。然而, 少有研究揭示微肥施用下, 作物生长、光合作用与 N 代谢过程的耦合演变关系。事实上, N 是叶绿素和光合作用酶的组成元素。光合作用和 N 代谢在作物中相互依存; N 代谢需光合作用产生三磷酸腺苷 (ATP) 和还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸 (NADPH); 光合作用也需 N 作为原料支撑, 并直接影响光合色素和电子传递链的活性^[14-16]。综上所述, 本研究分别探析叶面微肥或配施促吸收剂对橡胶树幼苗生长和光合作用的影响, 进一步结合作物氮的分配特征、营养水平、酶代谢活性, 揭示微肥对橡胶树幼苗生长的增效机制。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2022 年 3—6 月在位于海南省儋州市的中国热带农业科学院试验场九队基地进行。供试橡胶品种为热研 7-33-97, 试验选取生长势一致的两蓬叶橡胶组培苗为试验材料。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验共设置 4 个处理：①空白对照, CK (超纯水); ②微肥, W (浓度为 B 0.2%, Fe 0.1%, Zn 0.1%, Mn 0.1%, Mo 0.05%); ③促吸收剂 1+微肥, C₁+W (促吸收剂 1, 2%辛基葡萄糖苷+1%月桂酸己酯); ④促吸收剂 2+微肥, C₂+W (促吸收剂 2, 2%甘露醇+1%醋酸酯淀粉)。每个处理 3 个重复, 每个重复 6 棵橡胶苗。所选的微肥 W、促吸收剂 C₁、促吸收剂 C₂ 均为市售较为广泛, 或被证明在其他方面应用可行的肥料产品。橡胶苗采用水培方式种植, 培养试验容器为体积 43 L (52.5 cm×36 cm×23 cm) 的塑料箱, 在箱上放置隔板, 每箱为 1 个重复。先用 1/2 浓度 Hoagland 营养液预培养 20 d 后, 再换为完全营养液培养 40 d, 随后进行喷施试验。试验过程中根据箱中水位变化及时补充蒸馏水。培养过程中保持培养液 pH 为 6, 每隔 10 min 用通气泵通气 5 min, 每 10 d 更换 1 次营养液。各处理的喷施方法一致, 均是培养 60 d 后开始喷施, 每隔 10 d 于 16:00 进行一次等量叶面肥喷施, 试验期内共喷施 3 次, 均在橡胶树幼苗叶面及叶背喷施等量各处理液。

1.2.2 试验方法 采用称重法测定橡胶苗根、茎、叶鲜重, 105 °C 杀青后, 80 °C 烘干, 称量干重, 计算干鲜比。叶绿素含量采用改良 Arnon 法^[17]测定。净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 测定过程中全程使用自然光, 选择橡胶苗向阳面自上而下第 3 叶蓬中部叶片, 每株选择 3 片健康功能叶进行测定, 采用美国 LI-COR 公司 LI-6800 型光合仪于上午 9:00—11:00 测定。由仪器的监控装置、可调光源和内置式 CO₂ 供气系统调控叶温为 (25±1) °C, 人工光源的光合有效辐射为 1200 μmol/(m²·s), CO₂ 浓度为 400 μmol/mol, 数据稳定后读数, 重复 3 次。根系发育指标采用万深 LA-S 根系分析仪测定分析。采用离体法测定叶片硝酸还原酶 (NR) 活性、谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性、谷氨酸脱氢酶 (GDH) 活性^[14, 17]。

1.3 数据处理

利用 SPSS 24.0 软件 ANOVA 过程进行方差分析, 运用 Duncan 检验法检验不同处理各指标的差异显著性; 采用 CORR 过程作一元线性相关性分析。

2 结果与分析

2.1 喷施不同叶面肥对橡胶树幼苗生长的影响

2.1.1 对橡胶树幼苗单株干物质积累的影响 由表 1 可知, 喷施叶面肥对橡胶苗单株鲜重、干重有显著影响。对于单株鲜重和干重, 其含量表现为: C₂+W > C₁+W > W > CK。对于植株干鲜比, 其最大值出现在 C₂+W; W、C₁+W、CK 之间无显著差异。说明微肥能增加传统施肥的肥效, 尤其是与促吸收剂配施, 但作用效应取决于促吸收剂的类型。促吸收剂 C₂ 对橡胶树幼苗的干物质积累效应优于 C₁。

表 1 不同叶面肥对橡胶苗植株单株干物质积累的影响
Tab. 1 Effects of different leaf fertilizer on dry matter accumulation of per rubber seedling plant

处理 Treatment	鲜重 Fresh weight/g	干重 Dry weight/g	干鲜比 Dry/fresh
CK	12.90±0.82 ^d	3.93±0.14 ^d	0.30±0.01 ^b
W	44.92±0.80 ^c	13.89±1.18 ^c	0.31±0.02 ^b
C ₁ +W	55.55±5.83 ^b	17.70±0.97 ^b	0.32±0.02 ^{ab}
C ₂ +W	75.67±1.10 ^a	25.73±0.48 ^a	0.34±0 ^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).

2.1.2 对橡胶苗各部位干物质积累的影响 叶面肥对橡胶树幼苗根、茎、叶干鲜比的影响如表 2 所示, 根干鲜比最大值出现在 C₁+W 和 C₂+W 处理, 其次是 W 处理, CK 的值最低。茎干鲜比的情况与根干鲜比相似, 不同的是 CK 和 W 无显著差异。叶干鲜比则表现为: C₂+W≈W>C₁+W≈CK。表明促吸收剂配施, 尤其是 C₂, 对橡胶苗干物质的积累效应整体上优于单施微肥, 而且累积的部

表 2 不同叶面肥对橡胶苗植株各部位干物质积累的影响
Tab. 2 Effects of different leaf fertilizer on dry matter accumulation in different parts of rubber seedling

处理 Treatment	干鲜比 Dry/fresh		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CK	0.26±0.01 ^c	0.43±0.02 ^b	0.17±0.00 ^b
W	0.28±0.00 ^b	0.41±0.04 ^b	0.19±0.00 ^a
C ₁ +W	0.31±0.03 ^a	0.63±0.10 ^a	0.18±0.01 ^b
C ₂ +W	0.31±0.01 ^a	0.70±0.04 ^a	0.19±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).

位主要发生于根部和茎部。

2.1.3 对橡胶树幼苗根系发育的影响 根是植物养分吸收和生长发育的重要器官。由表 3 可知，与 CK 相比，微肥施用，尤其是与促吸收剂配施，显著增加了橡胶幼苗的根长、根表面积、总根体

积、根尖数和分叉数 ($P<0.05$)。表明微肥可促进橡胶树幼苗根系发育，且微肥与促吸收剂配施的效应优于微肥单施。此外， C_2+W 的促进作用大于 C_1+W ，表明促吸收剂 C_2 与微肥搭配使用对根系发育的促进效果更佳。

表 3 不同叶面肥对橡胶苗根系指标的影响
Tab. 3 Effects of different leaf fertilizer on root indexes of rubber seedlings

处理 Treatment	根长 Root length/cm	根表面积 Root surface area/cm ²	总根体积 Total root volume/cm ³	平均根系直径 Average root diameter/mm	根尖数 Root tip number	分叉数 Bifurcation number
CK	472.14±94.88 ^d	153.71±44.25 ^d	8.84±3.80 ^e	0.98±0.09 ^b	549±56 ^c	1175±47 ^d
W	1422.37±8.77 ^c	473.05±6.79 ^c	31.89±19.10 ^b	1.02±0.17 ^b	855±18 ^{ab}	5025±140 ^c
C ₁ +W	1778.36±44.34 ^b	620.31±22.40 ^b	45.48±7.55 ^b	1.01±0.14 ^b	917±13 ^a	5990±136 ^b
C ₂ +W	2167.12±76.81 ^a	941.24±49.54 ^a	77.45±7.95 ^a	1.26±0.03 ^a	791±16 ^b	6401±49 ^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 喷施不同叶面肥对橡胶树幼苗叶片光合作用的影响

2.2.1 对橡胶树幼苗叶片光合色素含量的影响 叶绿素是植物光合作用的催化剂，是作物生长诊断的重要参数。由表 4 可知，与 CK 相比，微肥单施或与促吸收剂配施可提高橡胶苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量的含量。其中，叶绿素 b 含量表现为： $C_2+W>C_1+W>W$ ，表明微肥与促吸收剂 C_2 配施更有利于 2 种叶绿素的合成。 C_1+W 和 W 的叶绿素 a 和叶绿素总量无显著差异，表明微肥单施或与促吸收剂 C_1 配施对光合色素的促进作用仅限于叶绿素 b。

表 4 不同叶面肥对橡胶苗叶片叶绿素含量的影响
Tab. 4 Effects of different leaf fertilizer on leaf chlorophyll content of rubber seedlings mg/g

处理 Treatment	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素总量 Total chl
CK	1.65±0.09 ^c	0.57±0.04 ^d	2.22±0.13 ^c
W	2.22±0.07 ^b	0.81±0.01 ^c	3.04±0.06 ^b
C ₁ +W	2.38±0.03 ^{ab}	0.90±0.04 ^b	3.29±0.01 ^b
C ₂ +W	2.55±0.10 ^a	1.02±0.03 ^a	3.57±0.12 ^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 ($P<0.05$).

2.2.2 对橡胶树幼苗叶片光合参数的影响 光合作用是植物利用光能将二氧化碳和水合成转化为有机物的过程。通常光合速率越高，越有利于植物有机物的合成与积累。由表 5 可知，不同施肥

处理下的 T_r 、 P_n 表现为： $C_2+W>C_1+W>W>CK$ 。表明微肥施用，尤其是与促吸收剂配施，可显著提高橡胶苗叶片的 T_r 和 P_n ，进而促进橡胶树幼苗的光合作用与有机物合成。其中， C_2 的效果优于 C_1 ，表明促吸收剂对光合作用的增效与其化学组成有关。因此 C_2 可能更适合作为橡胶幼苗光合作用提升的促吸收剂。

表 5 不同叶面肥对橡胶苗光合特性的影响
Tab. 5 Effects of different leaf fertilizers on photosynthetic characteristics of rubber seedlings

处理 Treatment	蒸腾速度 T_r /(mmol·kg ⁻¹ ·s ⁻¹)	净光合速度 P_n /(μmol·kg ⁻¹ ·s ⁻¹)
CK	0.015±0.0001 ^d	0.205±0.003 ^d
W	0.094±0.0001 ^c	0.430±0.004 ^c
C ₁ +W	0.178±0.0004 ^b	0.915±0.001 ^b
C ₂ +W	0.257±0.0022 ^a	0.995±0.001 ^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 喷施不同叶面肥对橡胶树幼苗氮代谢的影响

2.3.1 对橡胶树幼苗全氮含量的影响 微肥对橡胶树幼苗各部位全氮的累积也有一定的影响。如表 6 所示，对于叶全氮，其含量表现为： $C_2+W>C_1+W>W>CK$ 。这表明微肥施用，尤其是与促吸收剂配施，可显著提高幼苗叶片全氮的累积。其中又以 C_2 的效果最佳。然而，对于根全氮和叶全氮，虽然其在 W、 C_1+W 、 C_2+W 的含量均大于

CK, 但各施肥处理间无显著差异。表明微肥对各部位全氮的累积均有积极作用, 但促吸收剂仅对叶片全氮累积有积极作用。

表 6 不同叶面肥对橡胶苗各部位全氮含量的影响

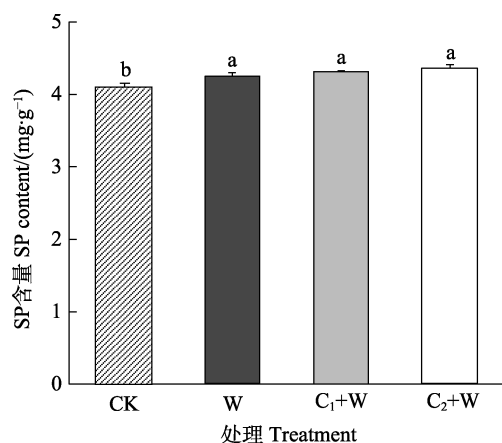
Tab. 6 Effects of different leaf fertilizers on total nitrogen content in each part of rubber seedlings g/kg

处理 Treatment	全氮含量 Total nitrogen content		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CK	12.81±2.43 ^b	11.31±1.07 ^c	26.12±2.61 ^b
W	17.23±0.18 ^a	16.84±0.10 ^b	34.32±0.75 ^a
C ₁ +W	17.77±0.05 ^a	17.04±0.20 ^b	35.31±0.13 ^a
C ₂ +W	18.09±0.94 ^a	21.06±0.28 ^a	36.52±0.25 ^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 ($P<0.05$).

2.3.2 对橡胶树幼苗叶片可溶性蛋白 (SP) 含量的影响 SP 是植物中重要的渗透调节物质和营养物质, 由图 1 可知, C₂+W、C₁+W、W 的 SP 含量均大于 CK。表明微肥单施或与促吸收剂配施均可提高橡胶树幼苗叶片中 SP 含量, 进而提升植物细胞的保水能力。然而, C₂+W、C₁+W 与 W 的 SP 含量无显著差异, 表明促吸收剂不能提高微肥对橡胶幼苗 SP 的增效作用。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

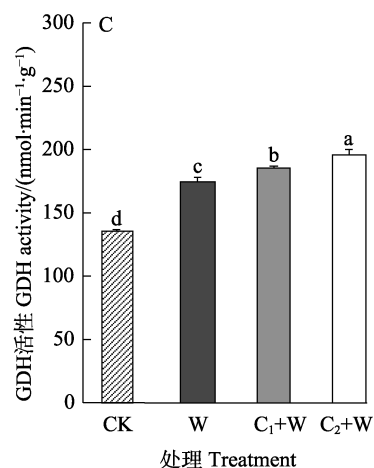
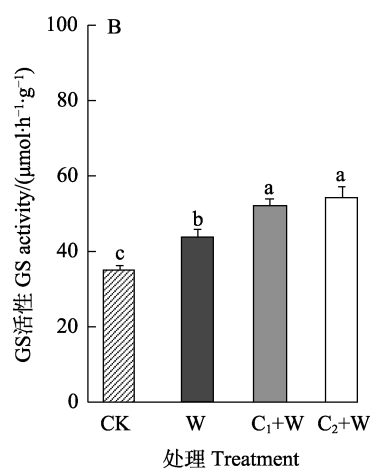
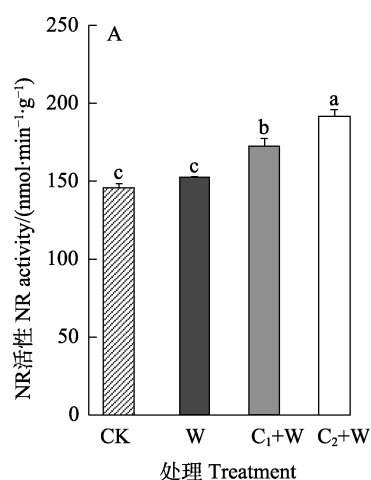
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 1 不同叶面肥对橡胶苗叶片 SP 含量的影响

Fig. 1 Effect of different leaf fertilizer on soluble protein of rubber seedling leaves

2.3.3 对橡胶树幼苗叶片氮代谢相关酶的影响 微肥对橡胶树幼苗叶片氮代谢酶活性也有一定影响。如图 2 所示, 对于谷氨酸脱氢酶 (GDH), 其活性为: C₂+W > C₁+W > W > CK, 表明微肥施

用, 尤其是与促吸收剂配施, 能显著提高橡胶幼苗的 GDH 活性。这将有利于植物体内的谷氨酸催化脱氢, 促进 NH₃ 进入氮代谢循环, 提高氮素



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 不同叶面肥对橡胶树幼苗叶片氮代谢相关酶活性的影响

Fig. 2 Effects of different leaf fertilizers on leaf nitrogen metabolism related enzymes activity of rubber seedlings

利用率。其中,又以与促吸收剂 C₂ 配施效果最佳。相似的结果也出现在谷氨酰胺合成酶 (GS) 和硝酸还原酶 (NR) 中,微肥与促吸收剂配施可显著提高 GS 和 NR 活性,利于植物中的无机态氮同化有机态氮。但 W 与 CK 的 NR 活性无显著差异。表明单施微肥不能提高 NR 活性,需与促吸收剂配施。此外, C₂+W 与 C₁+W 的 GS 活性无显著差异,表明 2 种促吸收剂对 GS 活性具有同等的增效作用。

2.4 植株干物质累积、光合作用、氮代谢的相关性分析

为揭示微肥对橡胶树幼苗生长的作用机制,对作物的干物质累积、光合作用特征进行相关性分析,结果见图 3,微肥施用下,橡胶的单株鲜重、干重、干鲜比等指标与根长、根表面积、总

根体积等指标呈正相关,也与叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素等光合色素指标呈正相关。这表明微肥对橡胶树幼苗生长的促进作用与其对根系发育、光合作用的强化有关。考虑到施肥还可通过影响 N 代谢而影响作物的根系发育和光合作用,对相关指标也进行了相关性分析。结果显示,橡胶树幼苗的根/茎/叶 N 含量、可溶性蛋白含量、GR、GDH 活性与根长、叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量等指标呈正相关。GS 活性、NR 活性与蒸腾速率、净光合速率、根长、根表面积、总根体积呈正相关。以上结果表明,微肥对橡胶树幼苗的根系发育、光合作用的促进作用与其对微肥氮代谢的强化作用密切相关。此外,研究还发现,橡胶幼苗各部位的 N 含量均与根长呈正相关,仅其茎的 N 累积量与根表面积、总根体积呈正相关。

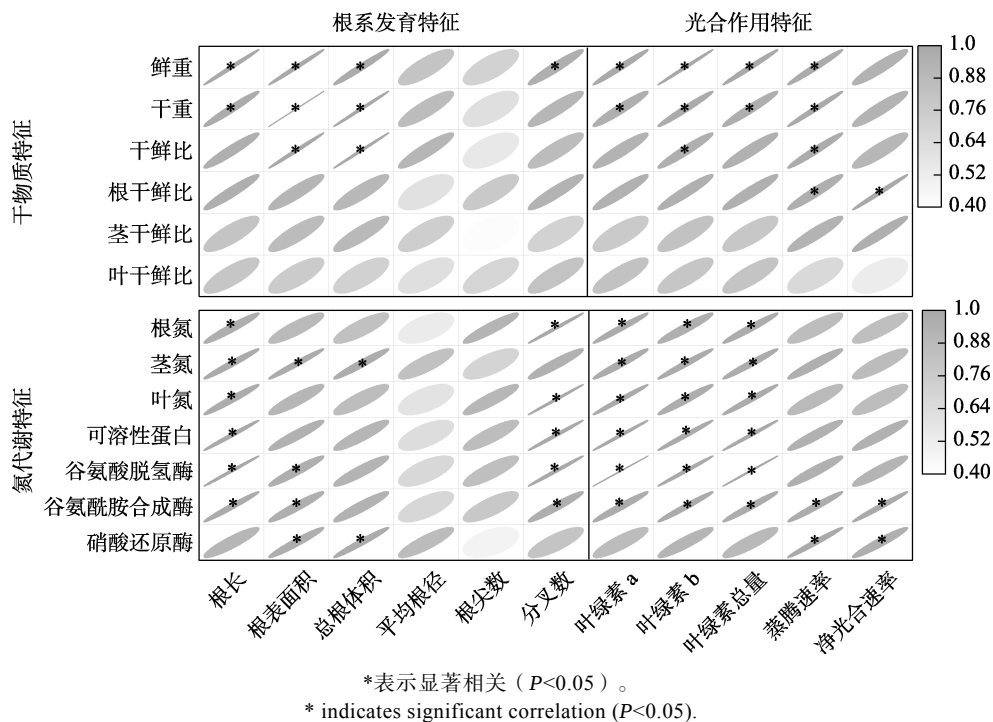


图 3 橡胶树幼苗植株干物质累积、光合作用、氮代谢的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of dry matter accumulation, photosynthesis and nitrogen metabolism in rubber seedlings

3 讨论

3.1 微肥对橡胶苗生长和光合作用的影响

本研究发现,施用微量元素叶面肥(微肥)能显著提高橡胶树幼苗的单株鲜重和干重。这表明微肥可促进橡胶树幼苗生长,增加其干物质合成与累积。与本研究结果一致,其他研究也发现,微肥能不同程度提高冬枣叶片微量元素 Se、B、Zn,以及大量元素 N、P、K、Ca 和 Mg 的含量,

进而促进冬枣叶片生长^[18];叶面喷施中低浓度 Fe 微肥后,可增强玉竹叶片的光合性能,并通过增加玉竹新生块茎的重量和直径来提高产量^[19]。本研究还发现微肥与促吸收剂配施的肥效远优于微肥单施。这表明促吸收剂配施可克服橡胶树叶片细胞排列紧密、腊质/角质层厚,微肥穿透能力差的特点,提高微肥肥力^[11]。其中, C₂ 的效果优于 C₁, 又表明促吸收剂对微肥的增效取决于其类型

和化学组成。 C_2 (甘露醇+醋酸酯淀粉) 可能比 C_1 (辛基葡糖苷+月桂酸己酯) 更适用于在橡胶树种植中与叶面肥配施。这可能与醋酸酯淀粉的增稠作用有关, 使甘露醇和微量养分更好附着于叶片表面, 延长养分叶面停留时间, 从而促进叶片对养分的吸收和利用^[20]。

根系发育也是影响微肥对橡胶树生物量累积的一个重要因素。众所周知, 根是植物的重要营养器官, 负责水分、无机盐及可溶性小分子有机质等的吸收^[7, 12]。根系越发达, 植株对养分的吸收能力越强^[21]。目前, 微量元素已被证实可促进碳水化合物运输和根系发育, 提高作物产量和抗逆性^[8, 19]。本研究也发现微肥可显著促进橡胶树幼苗的根系发育, 并与作物干物质累积呈正相关。然而, 与过去根系发育对叶片养分分配和生物量累积的作用特征不同^[22], 本研究发现微肥对根和茎的干物质累积效应大于叶。鉴于橡胶树采胶行为通常发生于树茎, 微肥施用下这种生物量累积特征可能有利于提高天然橡胶产量。作物的生物量累积还与植物的光合作用直接相关。本研究发现, 微肥施用后, 橡胶树幼苗叶绿素含量、蒸腾速率、净光合速率显著增加, 且与作物的单株鲜重、干重、干鲜比呈正相关关系, 表明微肥可通过提高作物对光能的捕获及转化能力进而促进作物生长^[7, 14-15]。其中, C_2+W 处理对叶绿素 b 含量的增加作用更强, 又表明促吸收剂 C_2 还可通过促进作物对光的吸收而增强其光合能力^[23]。因此, 微肥对橡胶树幼苗的促生作用主要包括 2 点: 一是促进根系发育, 提高养分利用效率; 二是强化光合作用, 提高碳水化合物的合成速率。

3.2 橡胶树幼苗生长特征、光合作用与氮代谢的关系

微肥对作物根系发育和光合速率的影响可能与其对 N 代谢的作用有关^[12-15]。N 不但是根系细胞的重要组成元素, 更是合成叶绿素和光合作用酶的重要元素。大量的研究结果表明, 微肥对作物氮代谢有积极影响。如易琼等^[24]研究表明施用微肥能促进荔枝树体对 N 的吸收, 并将其部分转运累积于叶片中, 并提高了土壤磷、钾的有效性。张运红等^[12]研究发现, 微肥能促进花生对 N 的吸收, 提高其在叶片和花生仁中的比例。然而, 少有研究揭示作物生长特征、光合作用与 N 代谢的关联。这不利于对微肥影响作物生长机制的深入

理解。本研究发现, 微肥能显著提高橡胶树幼苗 N 吸收和转移, 促进 N 的同化。这些过程与叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量等呈正相关, 初步证实了微肥可通过促进橡胶树幼苗根系对 N 的代谢利用, 提高光合色素合成。然而, 仅 GS、NR 活性与蒸腾速率、净光合速率、根长、总根体积等呈正相关, 表明微肥对橡胶苗净光合速率和根系发育的增强作用更多与氨转化成谷氨酰胺、谷氨酰胺再转变成谷氨酸等 N 代谢过程有关^[14, 16, 25]。众所周知, 进入植物体内的硝态氮须经还原成氨后, 方能转化成有机 N 化合物。GS、GDH 是其关键 N 同化酶^[25-26]。光合作用需 N 作为原料支撑, 并直接影响其光合色素和电子传递链的活性^[14, 27-28]。本研究中, 各施肥处理均提高 GS、GDH 活性也体现了这一点。然而, 与微肥单施不同, 微肥与促吸收剂配施也显著提高了 NR 活性, 尤其是促吸收剂 C_2 。表明促吸收剂配施还通过提高硝酸还原成亚硝酸的过程, 强化了 N 同化过程。这是作物 N 同化的第一步, 也是最关键的限速步骤^[14]。由此可见, 促吸收剂配施对提高橡胶树幼苗 N 代谢速率、增强光合作用, 促进作物生长至关重要。

4 结论

市场上典型微肥单独施用或配施促吸收剂改善了橡胶树幼苗的根系发育和光合特性, 促进了橡胶树幼苗的生长和干物质累积, 配施促吸收剂效果优于单独施用微肥, 其中, 微肥与促吸收剂 C_2 (甘露醇+醋酸酯淀粉) 配施的促进效果最为显著。同时, 研究还发现, 橡胶树幼苗的干物质累积量与根长、根表面积、根体积、叶绿素含量、蒸腾速率、净光合速率呈正相关, 并且根系发育、光合作用与作物各器官 N 累积量、叶片可溶性蛋白含量、NR 活性、GR 活性、GDH 活性呈正相关, 这说明微肥对橡胶树幼苗的促生作用机理主要包括 3 点: (1) 促进根系发育, 提高养分利用效率; (2) 强化光合作用, 提高碳水化合物的合成速率; (3) 强化橡胶树幼苗的 C 同化和 N 代谢过程的联系。因此, 配施促吸收剂是橡胶树幼苗种植过程中微肥叶面施用的必要措施。

参考文献

- [1] 赵春梅, 王文斌, 茶正早. 我国天然橡胶林养分管理研究

- 现状[J]. 热带农业科学, 2021, 41(2): 10-17.
- ZHAO C M, WANG W B, CHA Z Z. Nutrient management for rubber plantation in China[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(2): 10-17. (in Chinese)
- [2] 吴敏, 何鹏, 韦家少. 海南岛胶园土壤肥力的综合评价[J]. 中国土壤与肥料, 2009(2): 1-5.
- WU M, HE P, WEI J S. Integrated evaluation of soil fertility for rubber plantation in Hainan province[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2009(2): 1-5. (in Chinese)
- [3] 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 transport characteristics of soil inorganic nitrogen in rubber plantations[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(8): 1605-1614. (in Chinese)
- [4] KUMAR A S, LIU W J, SISSOU Z, WU J E, YANG B, JIANG X J, ZHU X, ZOU X, ZHANG W J, CHEN C F, RISHIKESH S, ARUN N J. A global review of rubber plantations: impacts on ecosystem functions, mitigations, future directions, and policies for sustainable cultivation[J]. Science of the Total Environment, 2021, 796: 148948.
- [5] WANG J C, REN C Q, CHENG H T, ZOU Y K, MANSOOR A B, LI Q F. Conversion of rainforest into agroforestry and monoculture plantation in China: consequences for soil phosphorus forms and microbial community[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 769-778.
- [6] 张凌霄, 李云, 赵家连, 茶正早, 杨红竹, 林清火, 郭澎涛, 黄艳艳, 罗微, 刘海林, 陈培花. 不同施肥措施对天然生胶性能的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(12): 158-164.
- ZHANG L X, LI Y, ZHAO J L, CHA Z Z, YANG H Z, LIN Q H, GUO P T, HUANG Y Y, LUO W, LIU H L, CHEN P H. Effect of different fertilization measures on properties of raw natural rubber[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023(12): 158-164. (in Chinese)
- [7] 罗雪华, 邹碧霞, 吴菊群, 杨俐苹. 氮水平和形态配比对巴西橡胶树花药苗生长及氮代谢、光合作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 693-701.
- LUO X H, ZOU B X, WU J Q, YANG L P. Effects of different nitrogen levels and $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios on the growth, nitrogen metabolism and photosynthesis of anther-derived somatic seedlings of *Hevea brasiliensis*[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(3): 693-701. (in Chinese)
- [8] 马琦琦, 李丽君, 王斌, 霍晓兰, 刘平. 微肥对植物生长作用及施用技术的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(13): 4-6.
- MA Q Q, LI L J, WANG B, HUO X L, LIU P. Research progress on the effects of micro-fertilizers on plant growth and application techniques[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(13): 4-6. (in Chinese)
- [9] HATTAB N, MOTELICA-HEINO M, FAURE O, BOUCHARDON J L. Effect of fresh and mature organic amendments on the phytoremediation of technosols contaminated with high concentrations of trace elements[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 159: 37-47.
- [10] 张祥会, 华元刚, 罗微, 林钊沐. 叶面喷施微肥对橡胶苗叶片营养含量的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(7): 1209-1212.
- ZHANG X H, HUA Y G, LUO W, LIN Z M. Effects of trace element fertilizer on nutrient content of rubber tree seedlings by foliar application[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(7): 1209-1212. (in Chinese)
- [11] 魏丽萍, 田耀华, 周会平, 岩香甩, 龚燕雄, 原慧芳. 遮荫处理对不同品种橡胶树叶片解剖特征和生长的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(1): 45-53.
- WEI L P, TIAN Y H, ZHOU H P, YAN X S, GONG Y X, YUAN H F. The influence of shade treatment on leaf anatomical characteristics and growth of different rubber varieties[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(1): 45-53. (in Chinese)
- [12] 张运红, 杨红燕, 杨占平, 黄绍敏, 和爱玲, 杜君. 不同叶面肥对花生光合特性与产量及氮吸收分配的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(4): 386-392.
- ZHANG Y H, YANG H Y, YANG Z P, HUANG S M, HE A L, DU J. Effects of different foliar fertilization on photosynthetic characteristics, yield and nitrogen absorption and distribution of peanut[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2020, 46(4): 386-392. (in Chinese)
- [13] 于西芸. 不同叶面肥对油桃幼树生长及碳氮代谢的影响[J]. 特种经济动植物, 2022, 25(8): 18-20.
- YU X Y. Effects of different leaf fertilizers on growth and carbon and nitrogen metabolism of nectarine young trees[J]. Special Economic Animals and Plants, 2022, 25(8): 18-20. (in Chinese)
- [14] 陈锦强, 李明启. 高等植物绿叶中的氮素代谢与光合作用的关系[J]. 植物生理学通讯, 1984(1): 1-8.
- CHEN J Q, LI M Q. Relationship between nitrogen metabolism and photosynthesis in green leaves of higher plants[J]. Plant Physiology Communications, 1984(1): 1-8. (in Chinese)
- [15] 李耕. 不同保绿类型玉米叶片光合特性与蛋白质组差异及氮素调控[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- LI G. Changes on photosynthetic characteristics and differential proteomics of leaf in different stay green type corn and N-fertilizer regulation[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)

- [16] 强斌斌. 施氮水平对大豆光合氮利用效率的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023.
QIANG B B. Effects of nitrogen application level on photosynthetic nitrogen use efficiency of soybean[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI H S. Experimental principles and techniques of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [18] 王艺燎, 刘毅, 秦国杰. 硒硼锌微肥配施对冬枣叶片生长及矿质营养的影响[J]. 果树资源学报, 2022, 3(6): 27-32.
WANG Y L, LIU Y, QIN G J. Effects of combined application of selenium, boron and zinc on leaf growth and mineral nutrition of winter jujube[J]. Journal of Fruit Resources, 2022, 3(6): 27-32. (in Chinese)
- [19] 谢进, 戴艳娇, 宋荣, 彭斯文, 朱校奇. 叶面喷施微肥对玉竹产量和品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2022(3): 38-42.
XIE J, DAI Y J, SONG R, PENG S W, ZHU X Q. Effects of spraying foliar micro-fertilizers on the yield and quality of polygonatum odoratum[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2022(3): 38-42. (in Chinese)
- [20] 李文宗, 张敏, 梁鑫, 王磊. 一种无人机叶面喷施用微肥: CN202011079699.7[P]. 2021-01-05.
LI W Z, ZHANG M, LIANG X, WANG L. A kind of UAV foliar spraying micro-fertilizer: CN202011079699.7[P]. 2021-01-05. (in Chinese)
- [21] 刘丽. 炭化苹果枝粉对重金属胁迫下苹果根系生长发育和养分吸收的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
LIU L. Effects of carbonized apple branch powder on root growth and nutrient absorption of apple under heavy metal stress[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [22] 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 uptake and distribution by rubber seedlings under different fertilization treatments[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 13(5): 519-523. (in Chinese)
- [23] 陈晨, 陈雪琼, 陈月珍, 冯顾城, 束胜, 王俐翔, 陶建平, 谭国飞, 陈姝妍, 刘佩卓, 王雅慧, 熊爱生. 叶面施氮对芹菜叶绿素含量及代谢有关基因表达的影响[J]. 植物生理学报, 2023, 59(8): 1533-1542.
CHEN C, CHEN X Q, CHEN Y Z, FENG G C, SHU S, WANG L X, TAO J P, TAN G F, CHEN S Y, LIU P Z, WANG Y H, XIONG A S. Effects of foliar application of nitrogen fertilizer on chlorophyll content and expression of metabolism-related genes in celery[J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(8): 1533-1542. (in Chinese)
- [24] 易琼, 李国良, 黄旭, 向旭, 唐拴虎, 黄巧义, 张木. 配施中微肥对荔枝产量、品质及养分吸收累积的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(9): 1649-1658.
YI Q, LI G L, HUANG X, XIANG X, TANG S H, HUANG Q Y, ZHANG M. Lychee yield, quality and nutrient uptake and accumulation as affected by application of medium and microfertilizers[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(9): 1649-1658. (in Chinese)
- [25] 纪 Y H, YUE L, CAO X S, CHEN F R, LI J, ZHANG J S, WANG C X, WANG Z Y, XING B S. Carbon dots promoted soybean photosynthesis and amino acid biosynthesis under drought stress: reactive oxygen species scavenging and nitrogen metabolism[J]. Science of the Total Environment. 2023, 856: 159125.
- [26] QIN J, YUE X L, FANG S Z, QIAN M Y, ZHOU S T, SHANG X L, YANG W X. Responses of nitrogen metabolism, photosynthetic parameter and growth to nitrogen fertilization in *Cyclocarya paliurus*[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 502: 119715.
- [27] 徐洪超, 逢洪波, 王兰兰, 李雪梅, 马莲菊, 张飞, 李玥莹. 高粱净光合速率和氮代谢关键酶活性对施氮量的响应及相关性分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 82-89.
XU H C, PANG H B, WANG L L, LI X M, MA L J, ZHANG F, LI Y Y. Responses of sorghum net photosynthetic rate and key enzyme activity in nitrogen metabolism to nitrogen application rate and correlation analysis[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(17): 82-89. (in Chinese)
- [28] 丁凯鑫, 冯乃杰, 郑殿峰, 单莹, 王立春, 田国奎, 王海艳, 李凤云. 植物生长调节剂对赤豆鼓粒期光合特性及氮代谢的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(12): 2510-2518.
DING K X, FENG N J, ZHENG D F, SHAN Y, WANG L C, TIAN G K, WANG H Y, LI F Y. Effects of plant growth regulators on photosynthetic characteristics and nitrogen metabolism of adzuki bean during Seed filling stage[J]. Journal of Nuclear Agronomy, 2022, 36(12): 2510-2518. (in Chinese)