

根系分泌物和栽培基质对橡胶树幼苗生长与生理特性的影响

陈七双, 王 坚, 李雪枫*, 罗宇航, 杨舒萍

热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室/海南大学热带农林学院, 海南海口 570228

摘 要: 根系分泌物对邻居植物的影响是决定植物与邻居植物共存状态的重要因素之一。本研究旨在探究根系分泌物和栽培基质对橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 幼苗生长与生理特性的影响情况, 分别以蒸馏水、灭菌蛭石和土壤为基质栽培橡胶树幼苗, 比较浇灌含有柱花草 (*Stylosanthes guianensis*) 根系分泌物 (SRE) 的营养液和浇灌含有橡胶树自身根系分泌物 (HRE) 的营养液时, 橡胶树的生物量累积与分配、地上部分与地下部分形态特征及生理特性的差异。结果表明: 土壤栽培和蒸馏水栽培时, 柱花草根分泌物处理下, 除根冠比、株高和根长差异不显著外, 橡胶树幼苗的地上生物量、地下生物量、总生物量、一级侧根数、叶绿素含量、类胡萝卜素含量、可溶性糖含量和根系活力均显著高于自身根系分泌物处理 ($P<0.05$), 且除根系活力外, 各指标的增幅均为蒸馏水栽培>土壤栽培; 丙二醛含量为柱花草根系分泌物处理显著低于自身根系分泌物处理 ($P<0.05$)。灭菌蛭石栽培时, 2 种根系分泌物处理下橡胶树的生物量和形态各指标及丙二醛含量均无显著差异, 但叶绿素、类胡萝卜素和可溶性糖含量及根系活力均在柱花草根分泌物处理下显著增大 ($P<0.05$)。3 种基质栽培的橡胶树幼苗在柱花草根分泌物处理下的隶属函数综合评价均高于自身根系分泌物处理, 且同种根系分泌物处理下栽培基质的综合评价均为蛭石栽培>蒸馏水栽培>土壤栽培。说明柱花草根分泌物可显著提高橡胶树幼苗的生理机能, 促进其生长状况, 但橡胶树对根系分泌物的响应情况受栽培基质的影响显著。

关键词: 根系分泌物; 栽培基质; 生物量积累; 光合色素; 根系活力

中图分类号: S794.1

文献标志码: A

Effects of Root Exudates and Cultivation Substrates on Growth and Physiological Characteristics of *Hevea brasiliensis* Seedlings

CHEN Qishuang, WANG Jian, LI Xuefeng*, LUO Yuhang, YANG Shuping

Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education / School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: The influence of root exudates on neighboring plants is one of the important factors determining the coexistence status of plants and their neighbors. This study aimed to explore the effects of the root exudates of *Stylosanthes guianensis* and cultivation substrates on the growth and physiological characteristics of *Hevea brasiliensis* seedlings. We cultivated *H. brasiliensis* seedlings with distilled water, sterilized vermiculite, and soil as cultivation substrates, and compared the differences in biomass accumulation and distribution, aboveground and underground morphological characteristics and physiological characteristics of *H. brasiliensis* when they respectively were irrigated with nutrient solutions containing the root exudates of *S. guianensis* and containing their own root exudates. The results showed that in soil culture and distilled water culture, the aboveground biomass, underground biomass, total biomass, primary lateral root number, chlorophyll content, carotenoid content, soluble carbohydrate content and root vitality of *H. brasiliensis* seedlings under the treatment of *S. guianensis* root exudates were significantly higher than those under the treatment of their own root exudate ($P<0.05$), except for the difference of root-shoot ratio, plant height and root length. Moreover, except for root vitality, the increase extent of the indexes was distilled water culture > soil culture. The malondialdehyde (MDA) content of *S. guianensis* root exudate treatment was significantly lower than that of *H. brasiliensis* root exudate

收稿日期 2024-12-16; 接受日期 2025-03-16

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32260344); 海南省自然科学基金项目 (No. 324RC444, No. 321RC471)。

作者简介 陈七双 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 热带植物资源及利用。*通信作者 (Corresponding author): 李雪枫 (LI Xuefeng), E-mail: xfli0922@163.com。

treatment ($P<0.05$). When cultured with sterilized vermiculite, there were no significant differences in biomass index, morphological index and MDA content of *H. brasiliensis* seedlings treated with root exudates of two kinds of plants, but chlorophyll content, carotenoid content, soluble sugar content, and root vitality were significantly increased under root exudates of *S. guianensis* treatment ($P<0.05$). The comprehensive evaluation of membership function of *H. brasiliensis* seedlings cultivated in the substrates under the treatment of root exudates of *S. guianensis* was higher than that of their own root exudates, and the comprehensive evaluation of cultivation substrates under the treatment of the same root exudates was vermiculite culture > distilled water culture > soil culture. It indicates that the root exudates of *S. guianensis* can significantly improve the physiological function of *H. brasiliensis* seedlings and promote their growth, but the response of *H. brasiliensis* to root exudates is significantly affected by the cultivation substrate.

Keywords: root exudates; cultivation substrate; biomass accumulation; photosynthetic pigments; root vitality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.06.009

植物根系分泌的有机酸、酚类、生物碱、萜烯等小分子次生代谢物和糖类、蛋白质等大分子化合物组成的复杂混合物统称根系分泌物^[1],它们可能通过直接调节植物的生理特性和形态特征等性能影响邻近植物的生长^[2-3],也可能通过改变土壤微生物群落、甚至土壤性质等植物生长微环境来影响邻近植物的生存^[1, 4],如积雪草(*Centella asiatica*)、龙葵(*Solanum nigrum*)等 15 种常见杂草的根分泌物可以降低小麦(*Triticum aestivum*)叶片的叶绿素含量和过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性,增加丙二醛(MDA)含量,从而抑制小麦的生长^[2];热研 2 号柱花草(*Stylosanthes guianensis* Reyan No. 2)根系分泌物使鬼针草(*Bidens pilosa*)的根生物量和根冠比显著增加,而株高、地上生物量和总生物量减少^[5];洋葱(*Allium cepa* var. *agrogatum*)释放的根系分泌物通过促进特定芽孢杆菌在邻近番茄(*Solanum lycopersicum*)根际定殖,增加番茄对土壤传播疾病的抗性,改善其生长适应性^[4];在咖啡(*Coffea arabica*)连作土壤中添加槟榔(*Areca catechu*)根系分泌物不但显著提高土壤钾元素的有效性和有机质含量,还可以增强咖啡根际土壤的酶活性,促进微生物之间的协同作用,维持咖啡连作土壤的功能^[6]。因此,根系分泌物被认为是介导植物之间相互识别与响应邻近植物的主要物质^[7-8],同时植物对其邻近植物根系分泌物的响应差异在决策植物与其邻近植物的种间关系方面具有重要作用^[5]。

大戟科(Euphorbiaceae)橡胶树属(*Hevea* Aubl.)的橡胶树(*Hevea brasiliensis*)因其产物天然橡胶是中国重要的工业原料和战略物资,成为中国热带地区重要的经济作物之一^[9]。在传统胶园建植中,橡胶树一般采用宽行种植(株行距

2.5 m×8 m、密度 495 株/hm²)来保证有高产质优的胶乳产出^[10],而橡胶树的单一种植可能会引发一些生态环境问题,例如土壤酸化、土壤质量下降、水分利用率降低以及水土流失等,还因橡胶树从种植到可以割胶产出一一般需要 6~8 a 的时间,这也可能对经济带来一定的挑战^[11-12]。针对这一现状,学者们进行了诸多研究与实践,已证明在可持续性发展的目标下,胶园林草间作是解决幼龄胶园建植问题、维持胶园生态系统整体健康和提高生产力的有效途径之一^[13-14],特别是豆科植物因具有结瘤固氮、培肥土壤的特性,成为幼龄胶园林草间作的有效选择,在胶园间作种植豆科植物可有效改善胶园土壤环境^[13, 15]、提高土壤质量^[16],从而利于橡胶树生长^[17]。但现有研究均主要着眼于橡胶树与豆科植物间作后橡胶树的生长情况、土壤理化性质等的变化,未考查间作植物根系分泌物对橡胶树生长的影响和栽培基质对根系分泌物作用的影响,无法明确在橡胶树—豆科植物间作系统的生长表现中,植物种间直接竞争与根系分泌物介导的种间识别与响应之间的作用差异,明了根系分泌物在间作系统植物互作中所起的作用。

因此,本研究以热区主要经济作物橡胶树幼苗为研究对象,收集含有优质豆科牧草热研 2 号柱花草根系分泌物的水培液,用其浇灌以水、土壤和蛭石为栽培基质种植的橡胶树幼苗,以浇灌含有橡胶树自身根系分泌物的水培液为对照,探讨在柱花草根系分泌物处理下不同基质栽培的橡胶树生长与生物量分配差异,分析橡胶树生理特性的变化,以期初步揭示柱花草根系分泌物和栽培基质对橡胶树生长与生理特性的调控潜力,为胶园林草间作系统构建与管理提供参考依据,为根系分泌物介导的橡胶树与间作植物的识别与响应提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物：橡胶树选用我国自主选育品种热研 73397 (*H. brasiliensis* Reyan 73397)，由中国热带农业科学院橡胶研究所种苗基地提供其组培苗；柱花草选用我国热带、亚热带地区广泛种植的优质草本豆科牧草热研 2 号柱花草 (*S. guianensis* Reyan No. 2)，由中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所热带牧草中期备份库提供。

培养基质：供试蛭石直径 3~6 mm，110℃ 经高压灭菌 1 h 后再次重复灭菌 6 次后备用；供试土壤为海南砖红壤，风干后筛除石子和其余杂质备用，土壤基本理化性质：pH 5.47，有机质含量为 25.02 g/kg，全氮含量为 0.61 g/kg，速效磷含量为 2.14 mg/kg，速效钾含量为 78.03 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 取黑色塑料桶（上口径 26 cm、下口径 22 cm、高 27 cm、底侧带有孔径 6 mm 排液开关）内盛放 1/2 Hoagland 营养液，橡胶树（株高约 30 cm，3 株/桶）或柱花草（株高约 25 cm，6 株/桶）植株的根系分别浸入营养液，茎基在塑料桶上口径处用泡沫板固定水培培养，每 3 d 补充营养液 1 次，以保持桶内水培液体积不变，连续培养 12 d 后收集含有橡胶树自身根系分泌物（HRE）或柱花草根系分泌物（SRE）的水培液进行后续试验。

参考王俐媛等^[3]的方法采用随机区组设计，将株高约 30 cm 的橡胶树幼苗平均分为 3 组，每组 24 个重复，第 1 组用 24 h 通气的蒸馏水水培培养（简称水培），每 3 d 补充 1 次蒸馏水，保持水培液体积不变；第 2 组用灭菌蛭石为基质盆栽（简称蛭石栽培），第 3 组用供试土壤为基质盆栽（简称土培），蛭石和土壤基质盆栽均浇灌蒸馏水，每 3 d 浇灌 1 次；栽培所用桶和盆的大小一致（上口径 22 cm，下口径 19 cm，高 26 cm），每盆/桶栽培 1 株。待植物稳定生长 5 d 后，将各组植物平均分为 2 个小组，每个小组 12 个重复，其中 1 个小组用收集的含有 SRE 的营养液更换部分水培液或浇灌盆栽橡胶树，每 3 d 更换/浇灌 1 次，每次更换量和浇灌量均为 350 mL（使土壤基质的持水量为最大持水量的 70%），以保证每盆植物受到等量根系分泌物的影响；另 1 个小组为对照，用相同的方法更换或浇灌含有橡胶树根系分泌物的营养液，简称 HRE 处理。每次取用含有柱

花草或自身根系分泌物的水培液后及时补充营养液，使各桶内水培溶液体积保持恒定。

1.2.2 测定指标与方法 将同期发育的橡胶树在供体根系分泌物处理下生长 45 d 后，从桶或盆中取出植株并冲洗干净根系，将各处理下橡胶树的 12 个植株随机等分为 2 份，一份首先测量每株橡胶树的株高（plant height, PH，植株基部至主茎顶芽处的高度）和枝下高（under branch height, UBH，植株基部至树冠最低分枝点的垂直高度）；再测量每株橡胶树的根系长度（root length, RL）和一级侧根数（primary lateral root number, PLR），然后用吸水纸吸干各处理橡胶树植株表面的水分，105℃ 杀青 30 min 后 70℃ 烘干至恒重，用感量 0.01 g 天平测定每株橡胶树的地上部分生物量（above-ground biomass, AB）、地下部分生物量（under-ground biomass, UB），计算总生物量（total biomass, TB）和根冠比（root-shoot ratio, RSR）；另一份在 -80℃ 保存，参考王学奎等^[18]的方法进行生理指标的测定，根系活力（root vitality, RV）测定采用 TTC 法，叶绿素含量（chlorophyll content, CL）、类胡萝卜素含量（carotenoid content, CD）、丙二醛含量（malondialdehyde content, MDA）测定均采用分光光度计法，可溶性糖含量（soluble carbohydrate content, SC）测定采用蒽酮比色法。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 软件进行数据整理；使用 IBM SPSS Statistics 21.0（SPSS Inc., Chicago, IL, USA）中的一般线性模型（General Linear Model, GLM）进行单变量（Univariate）数据方差分析，将供体根系分泌物和栽培基质作为固定因子、各测定指标分别作为因变量进行主效应分析以及根系分泌物与栽培基质之间的交互效应分析；采用 GraphPad Prism 9（GraphPad Software Inc., San Diego, CA, USA）软件制图，各项数据均以平均值±标准差（Mean±SD）表示。用 IBM SPSS Statistics 21.0 软件作主成分分析和相关性分析^[19]，将方差和累积性状的隶属函数值乘以相应权重，进行累加并求平均值，对 6 个处理下橡胶树各项指标进行综合评价，综合评价值越大，表示该处理下橡胶树生长品质越高。

隶属函数计算公式如下：

$$U(X_i) = \frac{(X_i - X_{imin})}{(X_{imax} - X_{imin})} \quad i=1,2,3,\dots,n$$

式中, $U(X_i)$ 表示第 i 项指标的隶属函数值, X_i 表示第 i 项指标的测定值, X_{imax} 为第 i 项指标测定值的最大值, X_{imin} 为第 i 项指标测定值的最小值, 若某指标与橡胶树品种呈负相关, 则用反隶属函数法进行计算:

$$U(X_i) = 1 - \frac{(X_i - X_{imin})}{(X_{imax} - X_{imin})}$$

各指标权重计算:

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

式中, P_i 表示主成分分析下第 i 项指标的贡献率; W_i 表示为第 i 项指标归一化在所有指标中的权重。为避免权重为负值, 取 $J > \max |W_i|$, 由于权重本质为相对数, 所以线性变化不会影响权重作用结果, 最终权重为:

$$W'_i = \frac{(J + W_i)}{2J}$$

综合评价值计算:

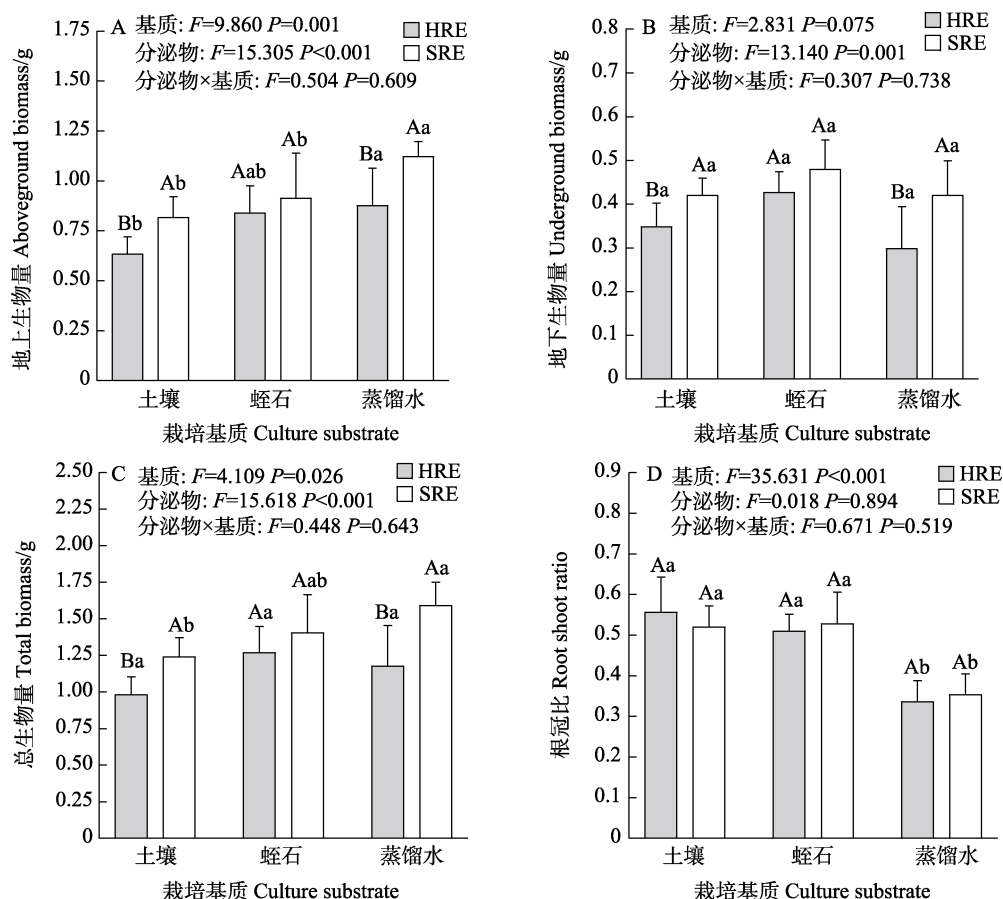
$$D = \sum_{i=1}^n [U(X_i) \times W'_i]$$

式中, D 值为不同处理下橡胶树的综合评价值。

2 结果与分析

2.1 橡胶树幼苗生物量积累与分配的变化

根系分泌物和栽培基质对橡胶树的生物量积累与分配均有显著影响, 但二者的交互作用不显著 (图 1)。同种基质种植时, SRE 处理下橡胶树的生物量积累均大于 HRE 处理 (图 1), 但仅土壤和水培时 2 种根系分泌物处理间差异显著 ($P < 0.05$)。其中土壤时 SRE 处理下橡胶树的地上生物量 (图 1A)、地下生物量 (图 1B)、总生物量 (图 1C) 分别比 HRE 处理显著增加 29.24%、20.57%、26.10% ($P < 0.05$); 水培时分别显著增加 33.71%、40.78%、35.20% ($P < 0.05$); 蛭石栽培时, 2 种根系分泌物处理间生物量均无显著差异



不同大写字母表示同一基质种植、不同根系分泌物处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一根系分泌物处理、不同基质种植间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant differences among treatments with different root exudates under the same substrate ($P < 0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences among substrates under the same root exudate treatment ($P < 0.05$).

图 1 根系分泌物与栽培基质对橡胶树生物量积累与分配的影响

Fig. 1 Effects of root exudate and cultivation substrate on biomass accumulation and distribution of *H. brasiliensis*

(图 1)。各栽培基质培养时, 2 种根系分泌物处理间橡胶树的根冠比均无显著差异(图 1D)。

HRE 处理下, 橡胶树的地上生物量水培比土培时显著高 38.88% ($P<0.05$), 蛭石栽培与土培和水培间均无显著差异(图 1A), 地下生物量和总生物量在 3 种栽培基质培养时均无显著差异(图 1B、图 1C)。SRE 处理下, 橡胶树的地上生物量在土培与蛭石栽培间无显著差异, 水培分别比土培和蛭石栽培显著提高 43.69% 和 26.44% ($P<0.05$, 图 1A), 地下生物量在 3 种栽培基质间也无显著差异(图 1B), 总生物量水培比土培时显著提高 28.58% ($P<0.05$), 在蛭石栽培时与土培和水培间均无显著差异(图 1C)。橡胶树的根冠比在 2 种根系分泌物处理下均为土培与蛭石栽培间无显著差异, 但水培时均比土培与蛭石栽培时显著降低 ($P<0.05$), SRE 和 HRE 处理下的平均降幅分别为 47.41% 和 58.76% ($P<0.05$, 图 1D)。

2.2 橡胶树幼苗形态特征变化

2.2.1 地上部形态特征变化 根系分泌物、栽培基质以及根系分泌物和栽培基质的交互作用对橡胶树的株高均无显著影响, 各处理下橡胶树的株高之间均无显著差异(图 2A); 但根系分泌物、栽培基质以及根系分泌物和栽培基质的交互作用对橡胶树的枝下高均有显著影响 ($P<0.05$, 图 2B)。土培和蛭石栽培时, 2 种根系分泌物处理下橡胶树的枝下高之间均无显著差异(图 2B); 水培时, SRE 处理下橡胶树的枝下高比 HRE 处理显著提高 61.40% ($P<0.05$, 图 2B)。HRE 处理下, 土培和蛭

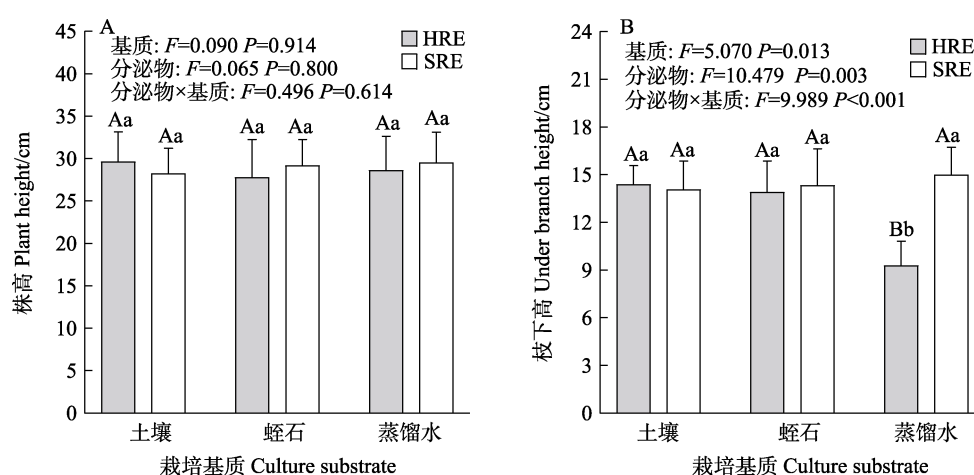
石栽培的橡胶树枝下高之间无显著差异, 水培处理的枝下高分别比土培和蛭石栽培显著降低 54.76% 和 49.55% ($P<0.05$); SRE 处理下, 3 种栽培基质培养的橡胶树枝下高之间无显著差异(图 2B)。

2.2.2 地下部形态特征变化 根系分泌物和栽培基质对橡胶树的地下部形态特征均有显著性影响, 但二者的交互作用不显著(图 3)。同种基质种植时, 2 种根系分泌物处理下橡胶树的根长之间均无显著差异(图 3A), 但 SRE 处理下橡胶树的一级侧根数均大于 HRE 处理, 其中蛭石栽培时二者间无显著差异, 土培和水培时 SRE 处理分别比 HRE 处理显著增加 40.82% 和 18.52% ($P<0.05$, 图 3B)。

HRE 处理下, 橡胶树的根长在蛭石栽培时最长, 比土培时显著提高 40.03% ($P<0.05$), 而土培时比水培时显著提高 92.88% ($P<0.05$, 图 3A); 橡胶树一级侧根数在蛭石栽培和水培间无显著差异, 二者的平均值比土培时显著提高 34.66% ($P<0.05$, 图 3B)。SRE 处理下, 橡胶树的根长也在蛭石栽培时最高, 比土培时显著提高 26.12% ($P<0.05$), 而土培时比水培时显著提高 110.09% ($P<0.05$, 图 3A); 橡胶树一级侧根数在蛭石栽培和土培间无显著差异, 水培时比土培和蛭石栽培时分别显著提高 39.13% 和 24.68% ($P<0.05$, 图 3B)。

2.3 橡胶树幼苗生理特性变化

2.3.1 叶绿素和类胡萝卜素含量变化 根系分泌物、栽培基质以及根系分泌物和栽培基质的交互作用对橡胶树叶片的叶绿素和类胡萝卜素含量均有显著影响 ($P<0.05$, 图 4)。同种基质种植时,

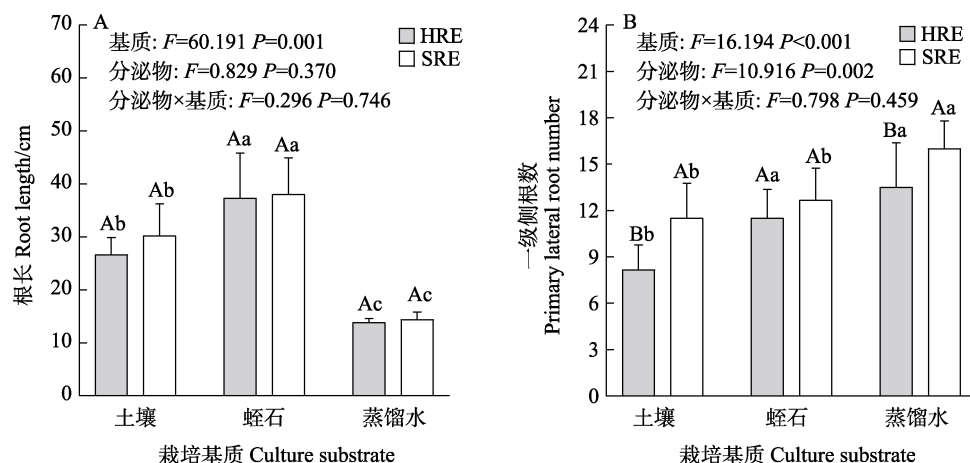


不同大写字母表示同一基质种植、不同根系分泌物处理间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一根系分泌物处理、不同基质种植间差异显著 ($P<0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant differences among treatments with different root exudates under the same substrate ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences among substrates under the same root exudate treatment ($P<0.05$).

图 2 根系分泌物与栽培基质对橡胶树地上部形态特征的影响

Fig. 2 Effects of root exudates and cultivation substrate on aboveground morphological characteristics of *H. brasiliensis*

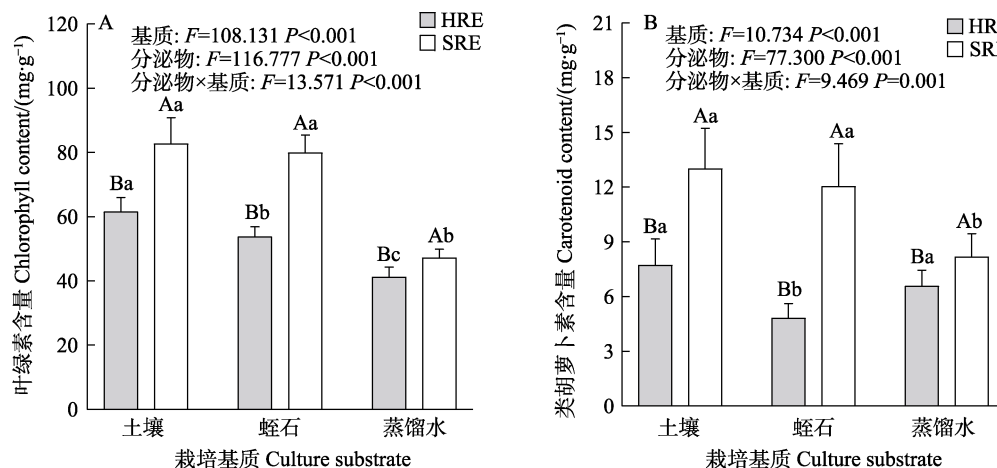


不同大写字母表示同一基质种植、不同根系分泌物处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一根系分泌物处理、不同基质种植间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant differences among treatments with different root exudates under the same substrate ($P < 0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences among substrates under the same root exudate treatment ($P < 0.05$).

图 3 根系分泌物与栽培基质对橡胶树地下部形态特征的影响

Fig. 3 Effects of root exudates and cultivation substrate on underground morphological characteristics of *H. brasiliensis*



不同大写字母表示同一基质种植、不同根系分泌物处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一根系分泌物处理、不同基质种植间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant differences among treatments with different root exudates under the same substrate ($P < 0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences among substrates under the same root exudate treatment ($P < 0.05$).

图 4 根系分泌物与栽培基质对橡胶树叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Fig. 4 Effects of root exudates and cultivation substrates on chlorophyll and carotenoid contents of *H. brasiliensis*

SRE 处理下橡胶树的叶绿素和类胡萝卜素含量均显著大于 HRE 处理 (图 4), 其中 SRE 处理下橡胶树叶片的叶绿素含量在土培、蛭石栽培和水培时分别比 HRE 处理显著增大 34.43%、48.70% 和 14.57% ($P < 0.05$, 图 4A), 类胡萝卜素含量分别比 HRE 处理显著增加 68.54%、149.67% 和 24.41% ($P < 0.05$, 图 4B)。

HRE 处理下, 土培时橡胶树的叶绿素含量最高, 分别比蛭石栽培和水培显著提高 14.53% 和 49.31%, 蛭石栽培比水培显著提高 30.37% ($P < 0.05$, 图 4A); 土培和水培橡胶树类胡萝卜素含量分别

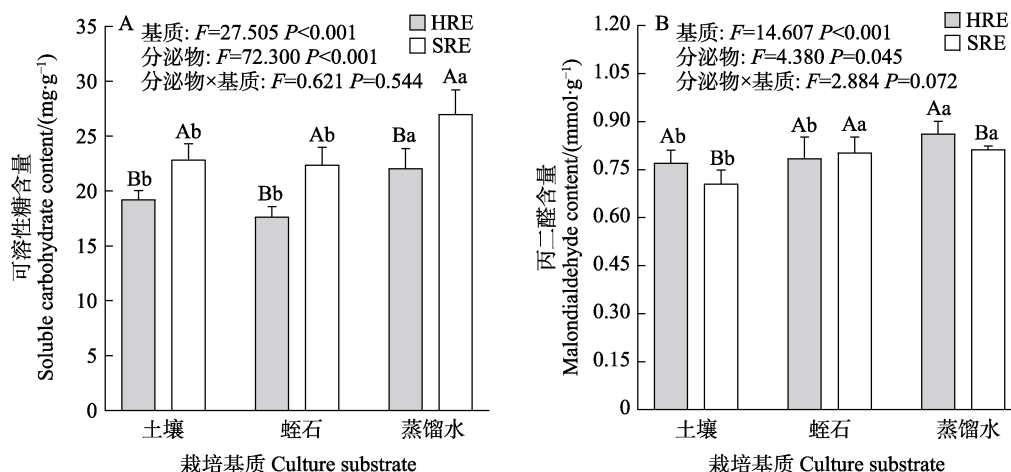
比蛭石栽培显著提高 60.15% 和 36.32% ($P < 0.05$, 图 4B), 但二者间无显著差异。SRE 处理下, 土培和蛭石栽培时橡胶树的叶绿素含量间无显著差异, 分别比水培时显著提高 75.19% 和 69.20% ($P < 0.05$, 图 4A); 橡胶树的类胡萝卜素含量也呈现相同的变化趋势, 土培和蛭石栽培间无显著差异, 分别比水培时显著提高 59.16% 和 47.22% ($P < 0.05$, 图 4B)。

2.3.2 可溶性糖与丙二醛含量的变化 根系分泌物和栽培基质对橡胶树叶片的可溶性糖和丙二醛含量均有显著影响, 但二者的交互作用影响不显

著(图 5)。同种基质种植时, SRE 处理下橡胶树叶片的可溶性糖含量均显著高于 HRE 处理, 土培、蛭石栽培和水培时分别显著提高 18.91%、26.95% 和 22.50% ($P<0.05$, 图 5A); SRE 处理下橡胶树叶片的丙二醛含量在蛭石栽培时与 HRE 处理间无显著差异, 在土培和水培时分别比 HRE 处理显著降低 8.46% 和 5.65% ($P<0.05$, 图 5B)。

HRE 处理下, 橡胶树叶片的可溶性糖和丙二

醛含量均表现为水培显著高于土培和蛭石培养 ($P<0.05$), 而土培和蛭石培养间均无显著差异(图 5)。SRE 处理下, 橡胶树叶片的可溶性糖含量在土培和蛭石栽培间无显著差异, 但二者分别比水培时显著降低 15.45% 和 17.15% ($P<0.05$, 图 5A); 橡胶树叶片的丙二醛含量在蛭石栽培和水培间无显著差异, 但二者分别比土培时显著增加 13.90% 和 15.35% ($P<0.05$, 图 5B)。



不同大写字母表示同一基质种植、不同根系分泌物处理间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一根系分泌物处理、不同基质种植间差异显著 ($P<0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant differences among treatments with different root exudates under the same substrate ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences among substrates under the same root exudate treatment ($P<0.05$).

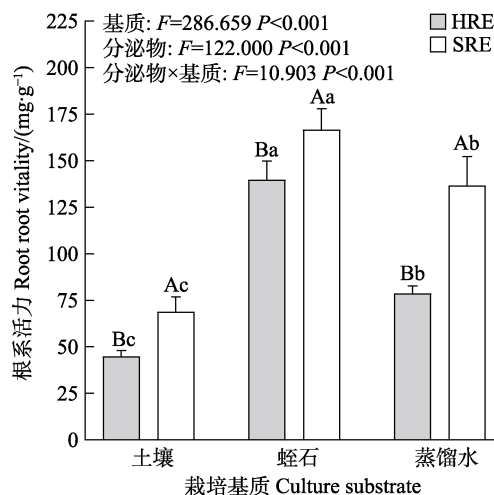
图 5 根系分泌物与栽培基质对橡胶树可溶性糖和丙二醛含量的影响

Fig. 5 Effects of root exudates and cultivation substrates on soluble carbohydrate and MDA contents of *H. brasiliensis*

2.3.3 根系活力变化 根系分泌物、栽培基质及根系分泌物和栽培基质的交互作用均对橡胶树的根系活力有显著影响(图 6)。同种基质种植时, SRE 处理下橡胶树的根系活力均显著高于 HRE 处理, 土培、蛭石栽培和水培时分别显著增加 53.89%、19.27% 和 73.83% ($P<0.05$)。HRE 处理下, 橡胶树的根系活力为蛭石栽培时最大, 比水培时显著提高 77.82% ($P<0.05$), 而水培时的根系活力比土培时又显著提高 75.77% ($P<0.05$); SRE 处理下的橡胶树根系活力在 3 种栽培基质间呈现同样的变化趋势, 蛭石栽培时最大, 比水培时显著增大 22.01% ($P<0.05$), 而水培时的根系活力比土培时显著提高 98.54% ($P<0.05$)。

2.4 综合分析

2.4.1 橡胶树生物量、形态特征、生理特性的相关性分析 由表 1 可知, 橡胶树的地上生物量与叶片可溶性糖含量、一级侧根数呈极显著正相关, 与根冠比呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与根系活力呈显著正相关 ($P<0.05$); 总生物量与可溶性糖含量、



不同大写字母表示同一基质种植、不同根系分泌物处理间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一根系分泌物处理、不同基质种植间差异显著 ($P<0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant differences among treatments with different root exudates under the same substrate ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences among substrates under the same root exudate treatment ($P<0.05$).

图 6 根系分泌物与栽培基质对橡胶树根系活力的影响
Fig. 6 Effects of root exudates and cultivation substrate on root vitality of *H. brasiliensis*

根系活力均呈极显著正相关,与一级侧根数呈显著正相关;地下生物量与枝下高、根长和根系活力均呈极显著正相关,与叶绿素和类胡萝卜素含量均呈显著正相关;根冠比与根长和叶绿素含量均呈极显著正相关,与一级侧根数、可溶性糖含量和丙二醛含量均呈极显著负相关。株高与枝下高呈显著正相关;枝下高与叶绿素含量呈显著正相关,与丙二醛含量呈极显著负相关;根长与叶绿素含量呈极显著正相关,与根系活力呈显著正相关,与可溶性糖含量呈极显著负相关;一级侧根数与可溶性糖含量和根系活力均呈极显著正相关。可溶性糖含量与根系活力、丙二醛、叶绿素和类胡萝卜素含量的关系均不显著,但丙二醛含量与叶绿素含量呈极显著负相关($P<0.01$),与类胡萝卜素含量呈显著负相关($P<0.05$)。

2.4.2 橡胶树生长状况的隶属函数法综合评价由表 2 可知,同种栽培基质培养下, SRE 处理的综合评价均高于 HRE 处理组;同种根系分泌物处理下,栽培基质的综合评价顺序均为:蛭石栽培>水培>土培。2 种根系分泌物、3 种栽培基质 6 种处理下橡胶树生长的综合评价顺序为:“柱花草根系分泌物—蛭石栽培”>“柱花草根系分泌物—水培”>“柱花草根系分泌物—土培”>“自身根系分泌物—蛭石栽培”>“自身根系分泌物—水培”>“自身根系分泌物—土培”。

3 讨论

3.1 根系分泌物和栽培基质对橡胶树幼苗生长的影响

与同种或异种邻居植物间的相互作用是引起植物生长响应的重要途径^[7, 21],植物能够通过调整地上和地下生物量分配策略或形态特征来适应环境变化,保障个体的生长和生存^[20, 22-24];而邻居植物的根系分泌物是影响植物生长的重要因素之一^[7, 25-27]。本研究发现,在水培条件下,与自身根系分泌物处理相比,柱花草根系分泌物显著提高橡胶树幼苗的地上和地下生物量、枝下高和一级侧根数,但对根冠比、株高和根长无显著影响,由此可推测柱花草根系分泌物有利于橡胶树幼苗的生物量积累及根系扩展,但对纵向生长作用不显著。这一结果也佐证了根系分泌物带有邻居植物高度特异性身份线索,植物可根据接收到的根系分泌物调整生长响应^[28],水培时橡胶树对柱花草根系分泌物的生长响应主要在于生物量积累、

一级侧根数的增殖和枝下高的变化。

植物的资源分配格局反映了植物在一定环境条件下的适合度和植物与环境的互馈关系^[29]。采用水培法探究根系分泌物对植物间识别与响应的作用虽然避免了其他信号干扰,但也阻碍了固相基质、土壤微生物和土壤养分等因素对其影响情况的了解^[26]。灭菌蛭石栽培时,柱花草根系分泌物处理下橡胶树的各生长指标与自身根系分泌物处理相比均无显著差异,而土培条件下,除根冠比、株高、枝下高和根长无显著差异外,橡胶树的其他生长指标的变化与水培时一致,均表现为显著高于自身根系分泌物处理,且生物量积累指标的增幅均为水培>土培,与陈青等^[30]水培比沙培下橡胶树幼苗的生物量及生长表现更优的研究结果相似。这一结果不但表明柱花草根系分泌物在土壤中也能促进橡胶树生物量积累和形态调整,也说明根系分泌物对植物生长的作用情况可能受栽培基质的质地结构、微生物群落结构、通气性等的显著影响。

发达的根系有助于植物调动和吸收土壤养分^[31],特别是较高的根长和侧根数可提高植物的资源捕获能力^[32]。柱花草根系分泌物处理下,3 种栽培基质间橡胶树幼苗的株高、枝下高和地下生物量均无显著差异,地上生物量、总生物量和一级侧根数均为水培时最高,根长和根冠比均为水培时最低,且除蛭石栽培时的根长显著大于土培时外,其他指标在蛭石栽培与土培间均无显著差异,再次说明栽培基质显著影响植物根系分泌物介导的橡胶树生长响应,特别是地下部响应。原因可能在于固相基质较大的物理阻力促使橡胶树幼苗的根系优先向土壤深层生长,通过深扎获取养分等资源,而液相基质相对较差的通气性使橡胶树幼苗优先分生侧根,在基质浅层获取资源,向地下部分配的生物量减少。与灭菌蛭石相比,土壤颗粒物的吸附、土壤微生物的降解和营养物质的多寡等都可能影响植物根系分泌物成分^[1, 4, 27],土壤微生物的分泌物也会改变植物根系分泌物的组成与分布^[33],致使根系分泌物介导的植物间的识别与响应结果也有所变化。土壤中各组分对柱花草根系分泌物与橡胶树生长之间关系的具体影响尚需进一步研究。

3.2 根系分泌物和栽培基质对橡胶树生理特性的影响

植物叶绿素含量和根系活力与植物的光合作

表 1 橡胶树各指标间的 Person 相关性分析
Tab. 1 Person correlation analysis between variables of *H. brasiliensis*

指标 Index	AB	UB	TB	RSR	PH	UBH	RL	PLR	SC	MDA	RV	CL	CD
AB	1												
UB	0.606**	1											
TB	0.968**	0.786**	1										
RSR	-0.539**	0.319	-0.319	1									
PH	0.288	0.218	0.295	-0.035	1								
UBH	0.210	0.489**	0.317	0.313	0.333*	1							
RL	-0.211	0.467**	-0.016	0.676**	-0.104	0.305	1						
PLR	0.479**	-0.006	0.367*	-0.560**	0.030	-0.038	-0.255	1					
SC	0.605**	0.163	0.521**	-0.486**	0.083	0.083	-0.458**	0.564**	1				
MDA	0.224	-0.134	0.128	-0.439**	0.055	-0.455**	-0.321	0.322	0.074	1			
RV	0.422*	0.450**	0.465**	-0.045	-0.062	0.209	0.351*	0.457**	0.174	0.247	1		
CL	-0.175	0.418*	-0.007	0.602**	-0.036	0.339*	0.583**	-0.270	-0.075	-0.533**	0.032	1	
CD	0.084	0.381*	0.183	0.288	0.156	0.253	0.220	-0.015	0.325	-0.398*	0.003	0.787**	1

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

表 2 不同处理下橡胶树各指标的隶属函数综合评价
Tab. 2 Comprehensive evaluation of membership function of each variable of *H. brasiliensis* under different treatments

根系分泌物 Root exudates	栽培基质 Cultivation substrates	隶属函数平均值 Average of affiliation function												D 值 D value	排名 Ranking	
		AB	UB	TB	RSR	PH	UBH	RL	PLR	SC	MDA	RV	CL			CD
HRE	土壤	0	0.275	0	1.000	1.000	0.892	0.529	0	0.169	0.584	0	0.490	0.354	0.296	6
	蛭石	0.386	0.706	0.468	0.789	0	0.807	0.969	0.426	0	0.495	0.779	0.302	0	0.416	4
	蒸馏水	0.452	0	0.320	0	0.459	0	0	0.681	0.815	0	0.278	0	0.214	0.311	5
SRE	土壤	0.341	0.670	0.423	0.833	0.252	0.836	0.675	0.426	0.846	1.000	0.198	1.000	1.000	0.626	3
	蛭石	0.551	1.000	0.694	0.871	0.757	0.883	1.000	0.574	0.828	0.375	1.000	0.932	0.881	0.808	1
	蒸馏水	1.000	0.670	1.000	0.076	0.955	1.000	0.023	1.000	1.000	0.310	0.753	0.145	0.410	0.749	2
权重		0.104	0.102	0.114	0.022	0.054	0.080	0.036	0.095	0.114	0.011	0.082	0.080	0.107		

用及新陈代谢强度密切相关^[34-35],类胡萝卜素是植物体中重要的非酶促类抗氧化物质^[36],可溶性糖调节碳水化合物的运转和利用^[37],而丙二醛含量可直观反映不良环境条件下细胞质膜受伤害的程度^[38]。诸多研究已表明,邻居植物的根系分泌物可显著影响植物的生理特性^[39-40]。本研究发现,3 种栽培基质培养的橡胶树幼苗叶绿素含量、类胡萝卜素含量、可溶性糖含量和根系活力均为柱花草根系分泌物处理显著高于自身根系分泌物处理,蛭石栽培的橡胶树幼苗丙二醛含量在 2 种根系分泌物处理间无显著差异,而土培和水培均为柱花草根系分泌物处理显著低于自身根系分泌物处理,由此可推测柱花草根系分泌物可能通过提高橡胶树的光合能力、抗氧化性、碳水化合物的运转速率和根系吸收能力等生理途径来有效增强其对栽培基质中各种不良因子的抗性,从而增强橡胶树的生长。

橡胶树在胁迫环境下易出现细胞膜结构损伤,MDA 含量增加,细胞功能受损使叶片中的可溶性糖等代谢产物不能顺利输送到根部而在叶部积累^[41]。王立丰等^[42]的研究也指出,胁迫环境下橡胶树叶片中的叶绿素和类胡萝卜素均显著降低,而 MDA 和可溶性糖含量显著升高。柱花草根系分泌物处理下,3 种栽培基质培养的橡胶树幼苗叶绿素、类胡萝卜素和可溶性糖含量均在蛭石栽培与土培间无显著差异、水培时色素含量显著降低而可溶性糖含量显著增大,丙二醛含量和根系活力均在土培时最低,蛭石栽培和水培时显著增高,由此推测,液相基质对橡胶树幼苗的生长胁迫显著大于固相基质,水培时橡胶树幼苗相对更优的生物量积累是植物体内抗氧化物质(如类胡萝卜素)和渗透调节物质(如可溶性糖)等协同缓解的结果,还需要对其他相关抗氧化酶的活性及其他调节物质含量等进一步研究来验证。

3.3 根系分泌物与栽培基质交互作用对橡胶树幼苗生长与生理特性的影响

本研究中,橡胶树的生物量累积与分配指标对根系分泌物和栽培基质的交互作用均无显著响应,形态指标中仅枝下高有显著响应,生理指标中叶绿素含量、类胡萝卜素含量和根系活力均受到显著影响,推测根系分泌物和栽培基质的交互作用主要影响橡胶树幼苗的光合能力和根系吸收能力,进而影响其形态调整,对生物量分配策略

的影响相对较小。此外,本研究发现,橡胶树幼苗的地上生物量与一级侧根数、根系活力和可溶性糖含量呈显著正相关,地下生物量与枝下高、根长、根系活力、叶绿素含量和类胡萝卜素含量呈显著正相关,但还未明确地上部与地下部生物量累积与分配主要受哪些指标的影响。DUAN 等^[43]研究已指出,根系构型在决定橡胶树养分获取中发挥着主导作用,因此,还需要对根系分泌物和栽培基质共同作用下橡胶树的根系构型进行进一步研究。

柱花草根系分泌物处理下 3 种栽培基质培养的橡胶树幼苗生长与生理情况的隶属函数综合评价均高于自身根系分泌物处理,且同种根系分泌物处理下栽培基质的综合评价均表现为蛭石栽培>水培>土培。由此既可推测栽培基质中有柱花草根系分泌物比自身根系分泌物更能有效增加橡胶树光合色素和可溶性糖的合成,增强其根系活力,从而提高橡胶树幼苗的光合能力、增强其养分吸收与转运能力,使橡胶树在柱花草为其间作植物时能生长更佳,这与 HU 等^[13]胶园行间间作柱花草的生长效应一致,也可推测透气和保水性能良好的固相基质更利于根系分泌物发挥其作用。这一研究结果充分说明植物的生长状况受邻居植物根系分泌物的显著影响^[7, 25, 27],植物根系分泌物可能直接或间接参与地下部的相互作用,从而影响邻居植物的表现^[27, 44]。因此,在林草间作系统构建中,必须重视根系分泌物介导的相邻植物间的生长和生理响应,利用根系分泌物来强化种间促进作用,提高资源利用率,实现农业生态系统可持续发展。

4 结论

(1) 柱花草根系分泌物能够显著促进橡胶树幼苗的地上、地下生物量积累,增加其一级侧根数以及根系活力、可溶性糖含量、叶绿素含量和类胡萝卜素含量,但栽培基质显著影响橡胶树幼苗对柱花草根系分泌物的响应,特别是地下部响应。

(2) 橡胶树幼苗的枝下高、叶绿素含量、类胡萝卜素含量和根系活力受根系分泌物和栽培基质交互作用的显著影响,地上生物量与一级侧根数、根系活力和可溶性糖含量呈显著正相关,地下生物量与枝下高、根长、根系活力、叶绿素含

量和类胡萝卜素含量呈显著正相关。橡胶树幼苗在蒸馏水、灭菌蛭石和土壤栽培下生长情况的隶属函数综合评价均高于自身根系分泌物处理。

参考文献

- [1] VIVES-PERIS V, OLLAS C D, GÓMEZ-CADENAS A, PÉREZ-CLEMENTE R M. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond[J]. *Plant Cell Reports*, 2020, 39(1): 3-17.
- [2] AKTER P, AHMED A M A, PROMIE F K, HAQUE M E. Root exudates of fifteen common weed species: phytochemical screening and allelopathic effects on *T. aestivum* L.[J]. *Agronomy*, 2023, 13(2): 381.
- [3] 王俐媛, 王坚, 李雪枫, 赵元辰, 许超. 根系分泌物在‘热研 2 号’柱花草与鬼针草生长早期期间干扰中的作用[J]. *草地学报*, 2022, 30(11): 3018-3025.
WANG L Y, WANG J, LI X F, ZHAO Y C, XU C. Effects of root exudates on interspecific interference between *Stylosanthes guianensis* Sw. ‘Reyan No.2’ and *Bidens pilosa* L. at early growth stage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 3018-3025. (in Chinese)
- [4] ZHOU X G, ZHANG J Y, RAHMAN M K U, GAO D M, WEI Z, WU F Z, DINI-ANDREOTE F. Interspecific plant interaction via root exudates structures the disease suppressiveness of rhizosphere microbiomes[J]. *Molecular Plant*, 2023, 16(5): 849-864.
- [5] 王俐媛, 王坚, 赵元辰, 许超, 李雪枫. ‘热研 2 号’柱花草对不同亲缘植物根系分泌物的生长响应[J]. *草业科学*, 2022, 39(2): 309-317.
WANG L Y, WANG J, ZHAO Y C, XU C, LI X F. Growth responses of *Stylosanthes guianensis* ‘Reyan No.2’ to root exudates from different relatives[J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(2): 309-317. (in Chinese)
- [6] ZHAO S G, ZHANG A, ZHAO Q Y, DONG Y P, SU L S, SUN Y, ZHU F F, HUA D L, XIONG W. The impact of main *Areca Catechu* root exudates on soil microbial community structure and function in coffee plantation soils[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1257164.
- [7] 孔垂华. 植物种间和种内的化学作用[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2141-2150.
KONG C H. Inter-specific and intra-specific chemical interactions among plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2141-2150. (in Chinese)
- [8] 李佳佳, 樊妙春, 上官周平. 植物根系分泌物主要生态功能研究进展[J]. *植物学报*, 2020, 55(6): 788-796.
LI J J, FAN M C, SHANGGUAN Z P. Research advances in the main ecological functions of root exudates[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2020, 55(6): 788-796. (in Chinese)
- [9] 刘锐金, 莫业勇, 杨琳, 伍薇, 何长辉. 我国天然橡胶产业战略地位的再认识与发展建议[J]. *中国热带农业*, 2022, (1): 13-18.
LIU R J, MO Y Y, YANG L, WU W, HE C H. Re-recognition and advice on the strategic role of natural rubber industry in china[J]. *China Tropical Agriculture*, 2022(1): 13-18. (in Chinese)
- [10] 叶德林, 石兆武, 王书拥, 王云春, 袁红章. 更新品种换代升级提高橡胶产业生产水平[J]. *热带农业科学*, 2015, 35(6): 82-86.
YE D L, SHI Z W, WANG S Y, WANG Y C, YUAN H Z. Update varieties and upgrade rubber industry to increase production level[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture* 2015, 35(6): 82-86. (in Chinese)
- [11] LIU Y, SHEN J P, ZHANG C H, CHEN Z. Impact of rubber-based land use changes on soil properties and carbon pools: A meta-analysis[J]. *Catena*, 2023, 227: 107121.
- [12] 孙海东, 刘备, 吴炳孙, 韦家少, 何鹏, 高乐, 吴敏. 橡胶树人工林地土壤酸化特征及酸化原因分析[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(2): 49-54.
SUN H D, LIU B, WU B S, WEI J S, HE P, GAO L, WU M. Characteristics and causes of soil acidification in the rubber plantation[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(2): 49-54. (in Chinese)
- [13] HU A, HUANG D, DUAN Q, ZHOU Y, LIU G, HUAN H. Cover legumes promote the growth of young rubber trees by increasing organic carbon and organic nitrogen content in the soil[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 197: 116640.
- [14] 陈磊, 熊康宁, 汤小朋. 林草间作系统研究概况[J]. *世界林业研究*, 2019, 32(6): 25-30.
CHEN L, XIONG K N, TANG X P. A Review of forest-grass intercropping system[J]. *World Forestry Research*, 2019, 32(6): 25-30. (in Chinese)
- [15] 王桂花, 吴敏, 王大鹏, 韦家少, 吴炳孙, 吴文冠, 陈志坚, 董荣书. 橡胶-豆科间作对植株生长和氮吸收的影响[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(6): 16-22.
WANG G H, WU M, WANG D P, WEI J S, WU B S, WU W G, CHEN Z J, DONG R S. Effects of plant growth and nitrogen absorption in the rubber-legume crops intercropping system[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(6): 16-22. (in Chinese)
- [16] 张志扬, 谭昕, 陈建, 王鹤儒, 李艺坚, 罗微. 不同郁闭度橡胶林间作豆科植物对土壤肥力的影响[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(15): 3863-3866.
ZHANG Z Y, TAN X, CHEN J, WANG H R, LI Y J, LUO W. The effects of intercropping legumes on soil chemical properties in different canopy density rubber plantation[J].

- Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(15): 3863-3866. (in Chinese)
- [17] 贺军军, 姚艳丽, 张华林, 戴小红, 罗萍. 胶园覆盖对土壤肥力及橡胶树根系活力的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(7): 1444-1450.
- HE J J, YAO Y L, ZHANG H L, DAI X H, LUO P. Effect of stylosanthes mulching on soil fertility and root activity of rubber plantation[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(7): 1444-1450. (in Chinese)
- [18] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2015: 324.
- WANG X K, HUANG J L. Experimental principles and techniques of plant physiology and biochemistry[M]. 3rd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2015: 324. (in Chinese)
- [19] 王绮玉, 刘欢, 仁增旺堆, 王敬龙, 罗建民, 黄颖, 董凯. 藏沙蒿种质材料苗期抗旱性综合评价[J]. 草地学报, 2023, 31(1): 148-156.
- WANG Q Y, LIU H, RENZENGWANGDDUI, WANG J L, LUO J M, HUANG Y, DONG K. Comprehensive evaluation of drought resistance of artemisia wellbyi germplasm at the seedling stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 148-156. (in Chinese)
- [20] WANG S, CALLAWAY R M. Plasticity in response to plant-plant interactions and water availability[J]. Ecology, 2021, 102(6): e03361.
- [21] RAZA M A, KHALID M H B, ZHANG X, FENG L Y, KHAN I, HASSAN M J, AHMED M, ANSAR M, CHEN Y K, FAN Y F, YANG F, YANG W. Effect of planting patterns on yield, nutrient accumulation and distribution in maize and soybean under relay intercropping systems[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 4947.
- [22] FRESCHET G T, SWART E M, CORNELISSEN J H C. Integrated plant phenotypic responses to contrasting above- and below-ground resources: key roles of specific leaf area and root mass fraction[J]. The New phytologist, 2015, 206(4): 1247-1260.
- [23] 翟偲涵, 王平, 盛连喜. 竞争条件下植物功能性状的表型可塑性研究进展[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2017, 18(4): 538-546.
- ZHAI S H, WANG P, SHENG L X. Phenotypic plasticity of plant functional traits in competition environments[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2017, 18(4): 538-546. (in Chinese)
- [24] 陈林丽, 王姝, 陈家兴, 尹任娅, 侯夏丽, 杨庆祝. 不同养分条件下喀斯特适生物种植物间相互作用诱导的形态可塑性[J]. 生态学杂志, 2024, 43(3): 773-782.
- CHEN L L, WANG S, CHEN J X, YIN R Y, HOU X L, YANG Q Z. Morphological plasticity induced by plant-plant interactions in karst-adaptive species under different nutrient conditions[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(3): 773-782. (in Chinese)
- [25] 李雪枫, 陈七双, 许超, 肖云霏, 罗瑛, 王坚. ‘热研 2 号’柱花草对不同邻近植物的识别与生物响应差异[J]. 草地学报, 2024, 32(10): 3225-3232.
- LI X F, CHEN Q S, XU C, XIAO Y P, LUO Y, WANG J. Studies on the discrepancy of recognition and biological response of *Stylosanthes guianensis* ‘Reyan No.2’ to different neighbor plants[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(10): 3225-3232. (in Chinese)
- [26] MERCER A C, EPPLEY M S. Kin and sex recognition in a dioecious grass[J]. Plant Ecology, 2014, 215(8): 845-852.
- [27] 吴清莹, 林宇龙, 孙一航, 魏千皓, 刘婧婷, 李雪峰, 崔国文. 根系分泌物对植物生长和土壤养分吸收的影响研究进展[J]. 中国草地学报, 2021, 43(11): 97-104.
- WU Q Y, LIN Y L, SUN Y H, WEI Q H, LIU J T, LI X F, CUI G W. Research progress on effects of root exudates on plant growth and soil nutrient uptake[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(11): 97-104. (in Chinese)
- [28] SEMCHENKO M, SAAR S, LEPIK A. Plant root exudates mediate neighbour recognition and trigger complex behavioural changes[J]. New Phytologist, 2014, 204(3): 631-637.
- [29] 何芸雨, 郭水良, 王喆. 植物功能性状权衡关系的研究进展[J]. 植物生态学报, 2019, 43(12): 1021-1035.
- HE Y Y, GUO S L, WANG Z. Research progress of trade-off relationships of plant functional traits[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(12): 1021-1035. (in Chinese)
- [30] 陈青, 周珺, 王新龙, 陈健, 王军. 不同培育方式对橡胶树实生苗生理指标、养分及长势的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(1): 118-124.
- CHEN Q, ZHOU J, WANG X L, CHEN J, WANG J. Effects of different cultivation methods on nutrients, physiological indexes[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2024, 32(1): 118-124. (in Chinese)
- [31] KAZUMICHI F. Plant strategy of root system architecture and exudates for acquiring soil nutrients[J]. Ecological Research, 2024, 39(5): 623-633.
- [32] MOMMER L, VISSER E J W, VAN RUIJVEN J, DE CALUWE H, PIERIK R, DE KROON H. Contrasting root behaviour in two grass species: a test of functionality in dynamic heterogeneous conditions[J]. Plant and Soil, 2011, 344(1/2): 347-360.
- [33] OBURGER E, JONES D L. Sampling root exudates-mission impossible?[J]. Rhizosphere, 2018, 6: 116-133.
- [34] 李洁, 庞蕊, 徐兴良, 梁涛. 高粱对不同身份邻居的形态学与生理学响应[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 1021-1035. (in Chinese)

- 800-805.
- LI J, PANG R, XU X L, LIANG T. Morphological and physiological responses for neighbor identity in sorghum vulgare[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental, 2017, 23(5): 800-805. (in Chinese)
- [35] GUO Q, SONG H, KANG J, KORPELAINEN H, LI C. Different responses in leaf-level physiology to competition and facilitation under different soil types and N fertilization[J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 150: 69-78.
- [36] 杨喜珍, 杨利, 覃亚, 刘磊, 杨欢, 谢婉. PEG-8000 模拟干旱胁迫对马铃薯组培苗叶绿素和类胡萝卜素含量的影响[J]. 中国马铃薯, 2019, 33(4): 193-202.
- YANG X Z, YANG L, QIN Y, LIU L, YANG H, XIE W. Effects of PEG-8000 stress on contents of chlorophyll and carotenoid of potato plantlets *in vitro*[J]. Chinese Potato Journal, 2019, 33(4): 193-202. (in Chinese)
- [37] 王凯, 赵成姣, 林婷婷, 于国庆, 孙菊. 水分处理对榆树幼苗不同器官非结构性碳水化合物含量的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 113-121.
- WANG K, ZHAO C J, LIN T T, YU G Q, SUN J. Effects of different water treatments on non-structural carbohydrates in different organs of *Ulmus pumila* seedlings in the horqin sandy land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 113-121. (in Chinese)
- [38] 赵子豪, 宋琦, 李利, 楼锦锋, 罗建勋, 俞飞. 南方四季杨雌雄幼苗对镉胁迫光合生理响应的差异[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(2): 201-207.
- ZHAO Z H, SONG Q, LI L, LOU J F, LUO J X, YU F. Difference in photosynthesis and physiological response of male and female *Populus deltoides* × *nigra* to Cd stress[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(2): 201-207. (in Chinese)
- [39] BOUHOUUEL I, GFELLER A, BOUDABBOUS K, FAUCONNIER M L, AMARA H S, DU JARDIN P. Physiological and biochemical parameters: new tools to screen barley root exudate allelopathic potential (*Hordeum vulgare* L. subsp *vulgare*)[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(2): 38.
- [40] 邱秋金, 洪涌, 肖清铁, 林瑞余. 化感小麦根系分泌物对看麦娘生长及保护酶活性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(5): 545-549.
- QIU Q J, HONG Y, XIAO Q T, LIN R Y. Impacts of root exudates from allelopathy wheat (*Triticum aestivum* L.) on the growth and protective enzyme activity of *Alopecurus aequalis* (L.)[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 48(5): 545-549. (in Chinese)
- [41] 安锋, 李昌珍, 张婷婷, 王立丰, 王纪坤, 谢贵水. 铝胁迫对橡胶苗生理和叶绿素荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4191-4198.
- AN F, LI C Z, ZHANG T T, WANG L F, WANG J K, XIE G S. Effects of aluminum toxicity on physiological and leaf chlorophyll fluorescent characteristics of rubber tree seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4191-4198. (in Chinese)
- [42] 王立丰, 安锋, 王纪坤, 邹智, 赖华英, 谢贵水. 不同旱害级别对开割和未开割橡胶树形态和生理特性的影响[J]. 热带作物学报, 2017, 38(10): 1777-1783.
- WANG L F, AN F, WANG J K, ZOU Z, LAI H Y, XIE G S. Effects of different drought grades on the morphological and physiological characterizations of tapping tree and virgin tree of *Hevea brasiliensis*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(10): 1777-1783. (in Chinese)
- [43] DUAN M C, LI L, DING G G, MA Z Q. Leading nutrient foraging strategies shaping by root system characteristics along the elevations in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations[J]. Tree physiology, 2022, 42(12): 2468-2479.
- [44] 尹晓童, 杨浩, 于瑞鹏, 李隆. 根系分泌物在作物多样性体系中对种间地下部互作的介导作用[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(8): 1215-1227.
- YIN X T, YANG H, YU R P, LI L. Interspecific below-ground interactions driven by root exudates in agroecosystems with diverse crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(8): 1215-1227. (in Chinese)