

橡胶/香露兜间作对香露兜香气成分的影响

张 昂¹, 李丽华^{1,2*}, 钟壹鸣^{1,3}, 钟大玲^{1,2}, 秦晓威¹, 吉训志¹, 周艳飞²,
鱼 欢^{1**}

1. 中国热带农业科学院香料饮料研究所/海南省热带香辛饮料作物遗传改良与品质调控重点实验室/农业农村部香辛饮料作物遗传资源利用重点实验室, 海南万宁 571533; 2. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000; 3. 热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室/海南大学林学院/海南大学热带作物学院, 海南海口 570228

摘 要: 香露兜是中国热带地区特色香料作物之一, 其叶片香气成分含量是鉴定香露兜品质的关键指标。香露兜适宜在遮阴条件下种植, 其中在橡胶林下间作香露兜是海南地区常见的栽培模式, 但橡胶间作香露兜后对香露兜叶片香气成分的影响仍未探明。本研究拟通过盆栽试验, 对比橡胶/香露兜间作处理和香露兜单作条件下土壤理化性质和香露兜叶片香气成分种类与含量的差异。结果表明, 橡胶/香露兜间作处理与香露兜单作相比, 显著提高土壤容重 13.63%, 土壤碱解氮含量 59.71%, 土壤速效磷含量 193.03%、土壤速效钾含量 9.78%, 土壤 pH 降低 1.00 ($P<0.05$); 间作和单作处理共检测出 10 类 68 种香气成分, 间作与单作相比, 酮类、呋喃类、呋喃酮类、烃类和酚类的物质种类数量分别减少 56.52%、14.29%、33.33%、20.00%、28.57% ($P<0.05$); 尽管呋喃类、烃类和酮类的香气成分含量分别显著减少 65.28%、20.88%和 69.00%, 但醇类、吡咯类、酯类和呋喃酮类香气成分含量分别增加 31.50%、597.56%、122.78%、96.89% ($P<0.05$)。土壤 pH 降低是香露兜叶片酮类、呋喃类、呋喃酮类、烃类和酚类香气成分组成减少的主要原因; 间作模式通过降低 pH、提高土壤速效磷和碱解氮含量显著提高醇类、吡咯类、酯类含量, 减少呋喃类、烃类含量; 吡咯类物质是香露兜叶片主要香气成分物质, 因此, 橡胶/香露兜间作模式显著促进香露兜品质提升。研究结果对优化和推广橡胶间作香露兜具有积极作用, 有助于促进胶农增收以及相关产业的可持续发展。

关键词: 橡胶树; 香露兜; 间作; 香气成分; 土壤; 理化性质

中图分类号: S344.2 文献标识码: A

Effects of *Hevea brasiliensis* and *Pandanus amaryllifolius* Roxb. Intercropping on Aroma Components of Pandan Plants

ZHANG Ang¹, LI Lihua^{1,2*}, ZHONG Yiming^{1,3}, ZHONG Daling^{1,2}, QIN Xiaowei¹, JI Xunzhi¹,
ZHOU Yanfei², YU Huan^{1**}

1. Institute of Spice and Beverage, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Hainan Key Laboratory of Genetic Improvement and Quality Control of Tropical and Fragrant Beverage Crops / Key Laboratory of Genetic Resource Utilization of Fragrant and Fragrant Beverage Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wanning, Hainan 571533, China; 2. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665000, China; 3. Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education / College of Forestry, Hainan University/ College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: As one of the characteristic spice crops in tropical areas of China, the content of aroma components is the key index to identify the quality of *Pandanus amaryllifolius* Roxb. (Pa). Pa is suitable for planting under shade of *Hevea brasiliensis* (Hb) forest in Hainan Island, China. However, the effect of Hb and Pa intercropping on the aroma compo-

收稿日期 2022-06-07; 修回日期 2022-07-05

基金项目 海南省自然科学基金高层次人才项目 (No. 2019RC323)。

作者简介 张 昂 (1991—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 热带作物高效栽培; *同等贡献作者: 李丽华 (2000—), 女, 本科生, 研究方向: 热带作物高效栽培。 **通信作者 (Corresponding author): 鱼 欢 (YU Huan), E-mail: wangyangyuhuan82@163.com。

ment of the leaves of Pa has not been explored. Pot experiments were set up to compare the differences of soil physical and chemical properties and the types and content of aromatic composition in Pa leaves under intercropping and monoculture treatments. The intercropping mode significantly increased the soil bulk density by 13.63%, the content of soil alkali hydrolyzed nitrogen by 59.71%, the content of soil available phosphorus by 193.03%, the content of soil available potassium by 9.78% and the soil pH reduced by 1.00 ($P < 0.05$). A total of 10 categories and 68 aroma components were detected in the intercropping and monocropping treatments. Compared with monocropping treatment, intercropping significantly decreased the number of ketones by 56.52%, furans by 14.29%, furanones by 33.33%, hydrocarbons by 20.00% and phenols by 28.57% ($P < 0.05$). Although furans significantly reduced the content of aroma components by 65.28%, hydrocarbons by 20.88% and ketones by 69.00%, they significantly increased the content of alcohol by 31.50%, pyrrole by 597.56%, esters by 122.78% and furanone by 96.89% ($P < 0.05$). The decrease of soil pH was the main reason for the reduction of ketones, furans, furanones, hydrocarbons and phenols. Intercropping indirectly increased the content of alcohols, pyrroles and esters and reduced the content of furans and hydrocarbons by reducing pH, while increasing soil available phosphorus and alkali hydrolyzable nitrogen. Pyrrole compounds were the main aroma components of Pa, thus the intercropping mode could significantly promote the quality of Pa. The results of this study would have a positive effect on the optimization and promotion of the Hb intercropping Pa mode, and also conducive to promoting the income increase of farmers and the sustainable development of related industries.

Keywords: rubber tree (*Hevea brasiliensis*); *Pandanus amaryllifolius* Roxb.; intercropping; aroma components; soil; physical and chemical properties

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.03.010

橡胶林是中国热带地区最大的热带经济林^[1], 其产物天然橡胶是我国重要的战略物资^[2]。橡胶林主要分布于云南、海南等热带地区, 其株行距宽广, 适宜发展林下经济^[3]。香露兜 (*Pandanus amaryllifolius* Roxb.) 是露兜树科 (*Pandanaceae*) 露兜树属 (*Pandanus*) 特色香料草本植物, 又名斑兰叶, 原产于印度尼西亚, 20 世纪 50 年代引入中国, 种植面积约 333 hm²^[4]。香露兜叶片具有独特的粽香香气, 经济价值高且粗生易种, 其光饱和点在 550~600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间, 适宜在林下弱光照的环境中种植^[5]。因此, 大力发展橡胶林下间作香露兜有助于提高橡胶林经济产值, 促进农民增收, 以及乡村振兴战略实施。

香露兜叶片含有的大量挥发性香气成分, 主要由醇类、芳香类、羧酸类、酮类、醛类、酯类、烃类、呋喃类、萜类等化合物种类组成^[4-5]。其中吡咯类, 如 2-乙酰-1-吡咯啉 (2-acetyl-1-pyrroline, 2AP) 是香露兜的主要香气成分, 也是评价香露兜品质优劣的主要参考指标。2AP 香气成分在水稻、爆米花、香水椰子中同样含有^[6], 但香露兜 2AP 含量是芳香型水稻的 10 倍, 非芳香型水稻的 100 倍^[7], 具有广阔的开发前景。前期研究表明, 2AP 等稻米香气物质受环境因子如光照、土壤湿度、矿物质离子、氮肥等显著影响^[8], LUO 等^[9]在芳香型水稻研究中发现硒的施用可提高 2AP 生物合成速率。此外, 香露兜叶片中含有大量天然

活性物质如角鲨烯、亚油酸、叶绿醇等同样受到环境因子调控, 例如土壤中镁元素缺乏或土壤盐胁迫能够引起香露兜活性物质含量的显著降低^[10-11]。

橡胶间作香露兜具有传统复合种植模式的优势, 即间作作物之间会产生协同互补效应, 使作物生理性状、产量和品质发生改变^[12]。例如前人研究发现, 在茶园间作乔木体系中, 乔木通过改善光合生态环境, 提高土壤养分和土壤酶活性, 减少茶树光合午休和养分供应不足等现象, 显著增加茶中氨基酸和咖啡碱含量, 提高茶叶品质^[13]; 李枝桦等^[14]在烟草与香料间作种植中发现, 烟草与香料作物间作形成化感物质, 导致烤烟增加许多新的致香成分; 在槟榔与香露兜间作模式中发现, 间作香露兜香气成分组成与单作相比差异较小, 但香气成分含量显著增加^[4]。然而, 橡胶间作香露兜对香露兜香气成分的影响目前尚未报道, 探究橡胶间作香露兜对香露兜叶片香气成分组成和含量的影响及其关键调控因子, 能够为优化橡胶间作香露兜模式提供理论基础, 有助于推广橡胶与香露兜复合栽培模式, 促进相关产业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料

试验位于中国热带农业科学院香料饮料研究所种质资源圃 (18°44'15"N, 110°11'32"E), 该

地区属于热带季风气候,年平均温度在 23~24 °C,大于或等于 10 °C 的积温 6655.7~9855.4 °C。年平均降水量 2100~2200 mm,其中 8—10 月雨量占年雨量的 40%~50%。年平均日照为 1500~2200 h。

选取生长状态基本一致,健康无病虫害培育半年的香露兜植株和培育一年的橡胶植株作为试验材料。试验用土为以砖红壤为主混合而成的质地均一的土壤。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 选取直径 35 cm,高 50 cm 的圆形花盆进行盆栽试验。橡胶定植于 2020 年 10 月,一个月以后再进行香露兜定植。观测时间为 2021 年 11 月。试验设计香露兜单作(M)和橡胶香露兜间作(I) 2 个处理,每个处理重复 10 次。试验期间采用相同的水肥管理措施。

1.2.2 指标测定 (1) 土壤养分含量测定。于 2021 年 11 月采用环刀法采集土壤样品,一个完整的环刀土壤样品在 105 °C 下烘干称重,并计算土壤容重(soil bulk density, SBD),计算公式: $SBD = \text{烘干土样质量} / \text{环刀容积}$ 。其余土壤样品在实验室避光晾干,研磨过 16 目筛(1 mm),采用电位法测定土壤 pH;使用硫酸提取-钼兰比色法测定土壤速效磷(soil olsen phosphorus, SOP)含量;采用醋酸铵-火焰光度计法测定土壤速效钾(soil available potassium, SAK)含量;采用碱解扩散法测定碱解氮(soil alkali hydrolyzed nitrogen, SAN)含量。(2) 环境指标测定。使用多参数土壤水分速测仪(TZS-2X-G)测土壤温度(soil temperature, ST)、土壤湿度(soil moisture, SM)、电导率(conductivity, Cond)。(3) 香气成分测定。a. 萃取方法。与土壤样品采集同期,每个处理随机选取 10 株香露兜,采集倒 5~7 叶位的新鲜叶片,用去离子水冲洗干净叶面杂质后,用洁净的纱布擦拭叶表面水分,室内静置 5 min 待其叶片表面水分挥发完全,环境温度为(20 ± 3) °C。剪碎并称取 4 g 鲜叶样品于 50 mL 离心管中,加入 15 mL 无水乙醇,使用数控超声波清洗器(KQ5200DE)在 400 W、40 KHz、50 °C 下超声波萃取 60 min,用 0.22 μm 有机相针式滤器(尼龙)过滤,获取提取液,使用 Agilent-7890 B/5977B 气相色谱-质谱联用仪(美国安捷伦公司)进行检测。b. 气相色谱质谱联用仪(GC-MS)分析。色谱(GC)条件:色谱柱为弹性石英毛细管柱

DB-WAX(30 m×0.25 mm×0.25 μm),以 1 mL/min 的高纯氦气(99.999%)为载气,不分流进样,进样口和接口温度为 250 °C。色谱柱初始温度为 50 °C,保持 2 min 后,以 5 °C/min 的升温速度升温至 100 °C,再以 6 °C/min 的速度升温至 250 °C,保持 5 min。质谱(MS)条件:离子源为 EI,温度 230 °C。四极杆温度为 150 °C,进样口温度为 250 °C,电压为 70 eV,扫描质量范围在 30~450 amu。

1.3 数据处理

1.3.1 香气成分数据分析 (1) 定性分析。结合质谱和保留指数对香露兜香气成分进行定性,质谱分析结果在 NIST2017 谱库中进行检索,对比定性;以相同条件使用 C₇~C₄₀ 正构烷烃混标(上海安谱实验科技有限公司),进行 GC-MS 分析,利用其保留时间按线性方程计算各成分的保留指数,对实测计算的保留指数与文献进行定性分析。

(2) 定量分析。精密吸取角鲨烯标准品(GC ≥ 98%,上海源叶生物科技有限公司)、叶绿醇标准品(GC ≥ 90%,上海源叶生物科技有限公司)、2-乙酰-1-吡咯啉标准品(纯度 95%,toronto research chemicals, Canada)以及甲醇(色谱纯),分别配置 50、100、150、300、500 μg/mL 溶液浓度,以样品的色谱条件,标准品浓度由低到高的顺序依次进样,每个浓度进样 3 次,得到各组分的定量线性关系图表,横坐标为各组分梯度浓度,纵坐标为 3 次测定峰面积的平均值。利用峰面积按照线性方程计算角鲨烯、叶绿醇、2AP 的含量,同时再根据 2AP 的含量对其他香气物质进行半定量。计算公式:

$$X_i = (A_i / A_s) \times C_s$$

式中, X_i 为待测物质含量; A_i 为待测物的峰面积; A_s 为 2-乙酰-1-吡咯啉的峰面积; C_s 为样品中 2AP 含量。

1.3.2 数据统计分析 使用 R 4.0.1 软件对香气成分种类及含量进行单因素方差分析,用于判断间作对香气成分种类及含量的影响,而后对香气成分种类及含量样本进行聚类(NMDS)分析,用于明确间作对香露兜香气成分的影响。使用 Canoco 4.5 软件对不同环境因子和香露兜香气成分种类及含量进行 CCA 分析,并使用 Origin 2021 软件进行环境因子和香气成分种类之间的相关性分析并作图,用于明确间作影响香露兜香气成分的关键调控因子。

2 结果与分析

2.1 间作对香露兜土壤环境因子的影响

由单因素方差分析(表 1)可知,间作与香露兜单作相比,土壤 pH 降低 1.00,土壤容重

(SBD)、碱解氮(SAN)、土壤速效磷(SOP)、土壤速效钾含量(SAK)分别提高 13.63%、59.71%、193.03%、9.78% ($P<0.05$)。间作对土壤湿度(SM)、土壤温度(ST)、电导率(Cond)无影响。

表 1 间作对土壤环境因子的影响

Tab. 1 Effect of intercropping mode on soil environmental factors

处理 Treatment	土壤湿度 SM/%	土壤温度 ST/°C	电导率 Cond/($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH	土壤容重 SBD/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤速效钾 SAK/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤碱解氮 SAN/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤速效磷 SOP/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
单作	18.88±0.55 ^a	20.24±0.10 ^a	139.52±16.63 ^a	7.15±0.08 ^a	1.78±0.06 ^b	38.13±1.60 ^b	51.95±2.65 ^b	5.44±0.24 ^b
间作	17.62±0.79 ^a	20.10±0.09 ^a	118.74±12.34 ^a	6.15±0.03 ^b	2.02±0.08 ^a	41.85±1.45 ^a	82.96±2.02 ^a	15.93±0.67 ^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 间作对香气含量物质组成的影响

间作和单作共检测出 68 种挥发性香气成分,间作检测出 44 种,单作检测出 61 种。由表 2 可见,间作香露兜的酮类、呋喃类、呋喃酮类、烃

类和酚类的物质种类与香露兜单作相比分别减少 56.52%、14.29%、33.33%、20.00%、28.57% ($P<0.05$)。间作对醇类、吡咯类、酯类、醛酮类、酸类等成分种类无影响。

表 2 间作对香露兜香气成分组成种类的影响

Tab. 2 Effect of intercropping on the composition and types of aroma components in *P. amaryllifolius* Roxb $\mu\text{g/g}$

处理 Treatment	醇类 Alcohols	吡咯类 Pyrroles	酮类 Ketones	酯类 Esters	醛酮类 Carbonyls	呋喃类 Furans	呋喃酮类 Furanones	酸类 Acids	烃类 Hydrocarbons	酚类 Phenols
单作 M	7.00±0.42 ^a	1.00±0.00 ^a	2.30±0.52 ^a	3.40±0.69 ^a	1.10±0.28 ^a	3.50±0.17 ^a	1.50±0.17 ^a	2.40±0.62 ^a	2.50±0.17 ^a	1.40±0.16 ^a
间作 I	6.60±0.37 ^a	1.00±0.00 ^a	1.00±0.21 ^b	4.50±0.27 ^a	0.70±0.30 ^a	3.00±0.15 ^b	1.00±0.00 ^b	2.50±0.54 ^a	2.00±0.00 ^b	1.00±0.00 ^b

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 ($P<0.05$).

由表 3 可见,间作处理中,香气成分含量最多的为醇类,单作香气成分最多为烃类。间作香露兜香气成分含量:醇类>烃类>呋喃酮类>吡咯类>呋喃类>酯类>酸类>酚类>酮类>醛酮类。单作香露兜香气成分含量:烃类>醇类>呋喃类>呋喃酮类>酚类>酯类>吡咯类>酸类>

酮类>醛酮类。橡胶香露兜间作与香露兜单作相比分别提高醇类、吡咯类、酯类和呋喃酮类香气成分含量 31.50%、597.56%、122.78%、96.89% ($P<0.05$),并且显著降低呋喃类 65.28%、烃类 20.88%和酮类 69.00%的香气成分含量($P<0.05$),却对醛酮类、酸类、酚类香气成分含量无影响。

表 3 间作对香露兜香气成分含量的影响

Tab. 3 Effect of intercropping on the content of aroma components in *P. amaryllifolius* Roxb

处理 Treatment	醇类 Alcohols	吡咯类 Pyrroles	酮类 Ketones	酯类 Esters	醛酮类 Carbonyls	呋喃类 Furans	呋喃酮类 Furanones	酸类 Acids	烃类 Hydrocarbons	酚类 Phenols
单作 M	310.19±26.84 ^b	18.92±5.05 ^b	14.50±5.85 ^a	26.06±5.95 ^b	6.16±2.25 ^a	173.86±34.94 ^a	133.97±9.42 ^b	16.93±6.75 ^a	343.05±26.16 ^a	31.98±12.79 ^a
间作 I	407.89±39.88 ^a	131.99±12.61 ^a	4.49±0.95 ^b	58.06±5.45 ^a	3.97±3.25 ^a	60.35±6.61 ^b	263.76±27.34 ^a	14.39±4.14 ^a	271.43±13.87 ^b	13.73±1.04 ^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 间作对香露兜香气成分的影响 NMDS 分析

对香气成分种类(胁强系数 stress=0.027)和含量(stress=0.079)分别进行 NMDS 分析,由图 1 可知,间作处理下香露兜香气成分组成和含量

的重复性较单作更好,单作与间作处理下的香露兜香气成分组成(stress=0.109)和含量(stress=0.079)均能准确反映数据排序的真实分布,并且单作与间作处理下的香露兜香气成分组成和含

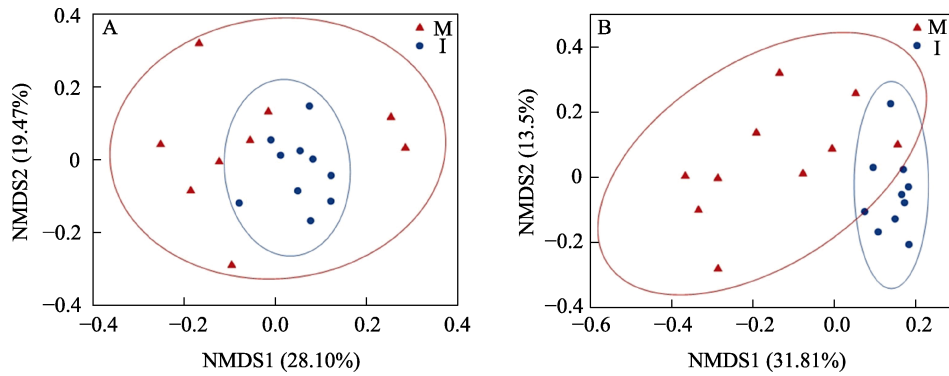


图 1 香露兜叶片香气成分组成和含量 NMDS 分析

Fig. 1 NMDS analysis of the composition and content of aroma components in the leaves of *P. amaryllifolius* Roxb.

量均存在明显差异。

2.4 影响香气成分组成和含量的主要土壤环境因子 CCA 分析

对香露兜香气成分组成和土壤环境因子进行 CCA 分析, 结果显示所有土壤环境因子共同解释了间作后香露兜香气成分组成变化的 23.17%。CCA 分析前 2 个排序轴分别解释总方差的 16.70% 和 6.47% (图 2)。影响香露兜香气成分组成的主要土壤环境因子为土壤 pH ($F=2.20, P<0.05$)、土壤速效磷 ($F=2.00, P<0.05$) 和土壤容重 ($F=1.90, P<0.05$)。

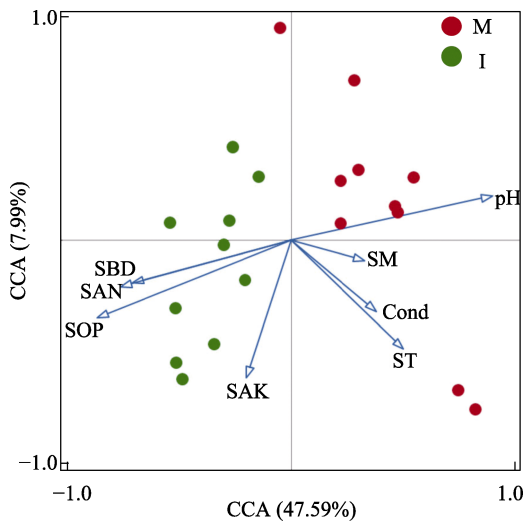


图 2 香露兜香气成分组成与土壤理化特性的典型对应分析 (CCA)

Fig. 2 Canonical correspondence analysis (CCA) of aroma components type in *P. amaryllifolius* Roxb. and physical and chemical properties of soil

香气成分含量和土壤环境因子 CCA 分析结果显示, 所有土壤环境因子共同解释了间作后香露兜香气成分含量变化的 55.58%, 前 2 个排序轴分别解释总方差的 47.59% 和 7.99% (图 3)。土

壤 pH ($F=11.70, P<0.001$)、土壤速效磷 (SOP, $F=11.60, P<0.001$)、土壤碱解氮 (SAN, $F=7.10, P<0.001$)、土壤容重 (SBD, $F=6.00, P<0.001$) 和土壤温度 (ST, $F=3.10, P<0.05$) 等 5 个指标是影响香露兜香气成分含量的主要土壤环境因子。

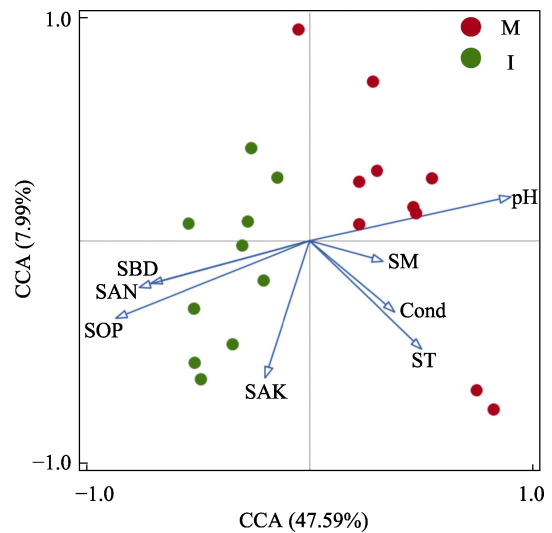


图 3 香露兜香气成分含量与土壤理化特性的典型对应分析 (CCA)

Fig. 3 Canonical correspondence analysis (CCA) of aroma components contents in *P. amaryllifolius* Roxb. and physical and chemical properties of soil

2.5 影响香气成分组成和含量的主要因素

通过相关性分析 (图 4A) 可知, 土壤温度与醇类 ($R=-0.402, P<0.05$) 组成呈显著负相关关系; 电导率与呋喃类 ($R=0.581, P<0.01$) 组成呈显著正相关关系; 土壤 pH 与酮类 ($R=0.488, P<0.05$)、呋喃类 ($R=0.480, P<0.05$)、呋喃酮类 ($R=0.638, P<0.01$)、烃类 ($R=0.529, P<0.05$) 和酚类 ($R=0.398, P<0.05$) 组成呈显著正相关关系; 土壤容重与醛酮类 ($R=-0.509, P<0.05$) 组成呈显著负相关关系;

土壤速效钾与烃类 ($R=-0.595, P<0.01$) 和酚类 ($R=-0.450, P<0.05$) 组成呈显著负相关关系; 土壤碱解氮与酮类 ($R=-0.552, P<0.05$)、呋喃酮类 ($R=-0.499, P<0.05$)、烃类 ($R=-0.570, P<0.01$) 和酚类 ($R=-0.404, P<0.05$) 组成呈显著负相关关系; 土壤速效磷与酮类 ($R=-0.506, P<0.05$)、呋喃类 ($R=-0.463, P<0.05$)、呋喃酮类 ($R=-0.514, P<0.05$)、烃类 ($R=-0.581, P<0.01$) 和酚类 ($R=-0.452, P<0.05$) 组成呈显著负相关关系。

土壤湿度与醇类 ($R=-0.403, P<0.05$) 含量呈显著负相关关系; 土壤温度与酮类 ($R=0.606, P<0.01$) 和呋喃类 ($R=0.476, P<0.05$) 含量呈显著正相关关系; 电导率与呋喃类 ($R=0.420, P<0.05$) 和烃类 ($R=0.571, P<0.01$) 含量呈显著正相关关系; 土壤 pH 与呋喃类 ($R=0.600, P<0.01$)、烃类 ($R=0.449, P<0.05$) 和酚类 ($R=0.459, P<0.05$) 含量呈显著正相关关系, 与醇类 ($R=-0.440, P<$

0.05)、吡咯类 ($R=-0.824, P<0.01$)、酯类 ($R=-0.644, P<0.01$) 和呋喃酮类 ($R=-0.599, P<0.01$) 含量呈显著负相关关系; 土壤容重与吡咯类 ($R=0.599, P<0.01$)、酯类 ($R=0.546, P<0.05$) 和呋喃酮类 ($R=0.582, P<0.01$) 含量呈显著正相关关系, 与醛酮类 ($R=-0.465, P<0.05$)、呋喃类 ($R=-0.497, P<0.05$) 含量呈显著负相关关系; 土壤速效钾与酯类 ($R=0.518, P<0.05$) 含量呈显著正相关关系; 土壤碱解氮与醇类 ($R=0.428, P<0.05$)、吡咯类 ($R=0.731, P<0.01$)、酯类 ($R=0.569, P<0.01$) 和呋喃酮类 ($R=0.608, P<0.01$) 含量呈显著正相关关系, 与呋喃类 ($R=-0.467, P<0.05$) 含量呈显著负相关关系; 土壤速效磷与吡咯类 ($R=0.830, P<0.01$)、酯类 ($R=0.684, P<0.01$) 和呋喃酮类 ($R=0.645, P<0.01$) 含量呈显著正相关关系, 与呋喃类 ($R=-0.547, P<0.05$)、烃类 ($R=-0.460, P<0.05$) 含量呈显著负相关关系 (图 4B)。

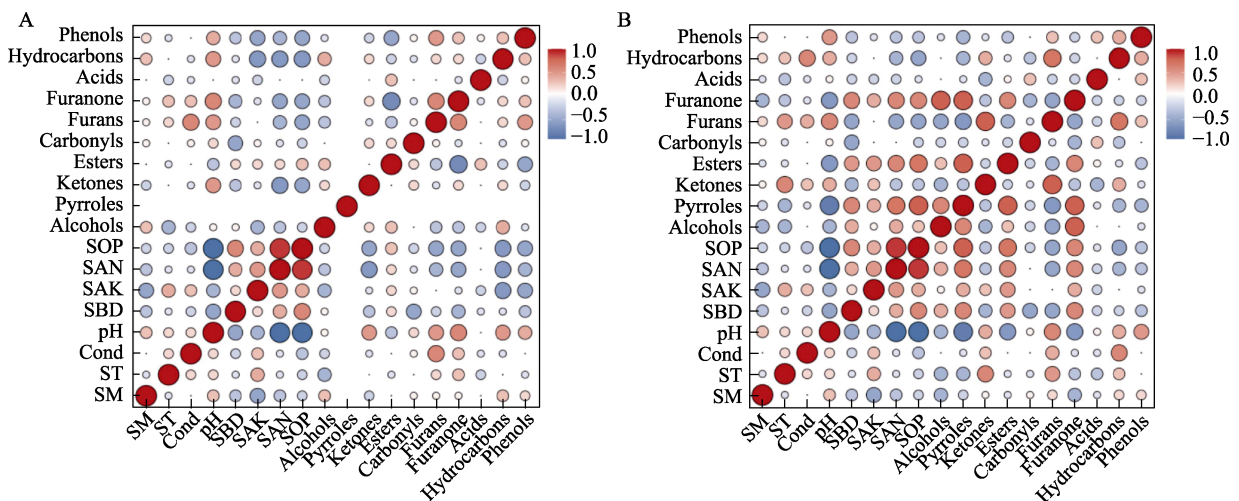


图 4 香气成分组成 (A) 和含量 (B) 与土壤环境因子的相关性

Fig. 4 Correlation between the composition (A) and content (B) of aroma component and soil environmental factors under different planting patterns

3 讨论

3.1 间作对土壤理化性质的影响

间作是一种能够改善土壤生态环境的种植模式^[15], 已有研究表明, 间作能够显著影响土壤理化性质^[16], 如李杨辉等^[17]在苹果间作苜蓿后发现土壤 pH 显著降低。在本研究中, 橡胶香露兜间作同样降低土壤 pH, 这可能与橡胶根际分泌物产生大量十六烯酸、油酸等物质有关^[18]。土壤容重大小可以反映出土壤孔隙度、田间持水量等土壤物理性质^[19], 一般情况下与土壤有机质呈负相关关系^[20]。前期研究发现在香蕉^[21]和玉米^[22]等间作

体系中土壤容重呈降低趋势, 但本研究中间作使土壤容重增加, 而土壤含水量并无差异, 这可能是由于间作香露兜后橡胶林土壤有机质含量显著降低, 土壤团聚体被破坏所致^[23]。土壤速效养分是植物从地下部最易获取的养分^[24], 刘在民等^[25]在苜蓿/大白菜间作模式下发现间作与单作相比土壤速效养分含量显著提高, 在本研究同样能够证实上述结果。首先, 土壤 pH 的变化会影响土壤中离子交换过程^[26], 间作后土壤 pH 降低使磷、钾等离子交换发生改变, 加速土壤养分累积^[27]; 其次, 间作后作物土壤菌群改变, 土壤菌群的改

变增强土壤磷酸酶、过氧化氢酶等酶活性^[28-29]，加速土壤中氮、磷、钾的释放，提高土壤速效磷、土壤速效钾、土壤碱解氮含量。众所周知，土壤养分是植物生长发育的重要养分来源，土壤养分等理化性质的改变将直接影响植物对养分的吸收和利用效率，显著影响植株的生长发育以及品质形成^[30]。因此，土壤理化性质和养分条件的变化可能是显著调控香露兜香气成分的主要原因之一。

3.2 间作对香气成分组成的影响

香露兜是一种热带香料作物，香气成分是其次生代谢产物，主要分布在叶片^[31-32]。运用 GC-MS 技术比较分析不同种植模式下香露兜香气成分组成和含量的变化规律，结果发现，香露兜香气成分由醇类、吡咯类、酮类、酯类、醛酮类、呋喃类、呋喃酮类、酸类、烃类、酚类等 10 类物质组成^[33]。在前期相似的研究中发现烟草在间作模式中显著增加新的致香物质主要与土壤理化因子的变化密切相关^[14]。土壤中养分含量的变化通过影响作物对养分的吸收速率，进而调控某些香气成分前体物质的合成和基因的表达，造成香气成分组成发生改变^[34]。本研究结果证实土壤 pH、土壤容重、土壤速效磷是主要影响香露兜香气成分组成的主要环境因子。土壤速效磷与酚类、烃类、呋喃类、呋喃酮类、酮类物质组成均呈显著负相关关系表明，间作处理下适宜的光合有效辐射以及土壤速效钾和磷等土壤养分含量的增加可能改变了香露兜生长速率与香气成分合成的平衡关系，通过加速香露兜的营养生长，抑制部分香气成分的合成路径，进而减少香气成分种类^[33-35]。本研究中，pH 与酮类、呋喃类、呋喃酮类、烃类和酚类的香气成分组成数量呈正相关关系表明，土壤 pH 的降低通过抑制植物对土壤养分的吸收^[35]及其基因表达^[27]是使酮类、呋喃类、呋喃酮类、烃类、酚类香气成分组成减少的另一个主要因素。

3.3 间作对香露兜香气成分含量的影响

OKPALA 等^[36]、LUO 等^[37]、XIE 等^[38]在香稻试验中发现，环境因子对香米的香气成分含量有显著影响。在槟榔间作香露兜的研究中发现，光合有效辐射同样是调控香露兜香气成分含量的主要因素。但在本研究中，影响香露兜香气成分含量的主要环境因子是土壤 pH、土壤容重、土壤碱解氮和速效磷含量。究其原因，首先，前人研究认为土壤 pH 变化是影响作物品质产生的主要

因子之一^[39]，在本研究中，土壤 pH 与醇类、吡咯类、酯类、呋喃酮类含量呈负相关关系，却与呋喃类和烃类含量呈显著正相关关系，可能是由于 pH 降低调控土壤细菌种类及土壤酶活性变化^[40-41]，影响土壤中含有氮磷钾等有机质的矿化速率，进而改变香露兜的养分吸收速率^[42-43]，使醇类、吡咯类和酯类香气成分含量增加，呋喃类和烃类香气成分含量降低；其次，氮和磷是作物促进香气成分物质合成和代谢的主要元素之一^[24, 44]。有研究指出土壤中的氮和磷含量缺乏会降低烟叶中部分与香气成分相关的次生代谢产物合成，进而减少部分香气成分含量^[42, 45]。本研究结果与上述研究保持一致，即土壤碱解氮和速效磷与香露兜香气成分吡咯类、酯类和呋喃酮类含量呈显著正相关，间作处理下土壤速效磷含量的增加显著促进醇类、吡咯类、酯类和呋喃酮类等香气成分含量的提高。然而，间作后提高土壤速效磷含量却可能抑制呋喃类和烃类的前体物质的合成。综上所述，橡胶间作香露兜模式通过显著降低土壤 pH，以及提高土壤碱解氮和速效磷含量，显著促进醇类、吡咯类、酯类和呋喃酮类等香气成分含量的提高，以及呋喃类和烃类物质含量的下降。

吡咯类物质中的 2AP 是香露兜棕香香气的主要来源，也是评价香露兜品质好坏的主要参考依据，在本研究中发现橡胶香露兜间作显著提高吡咯类物质含量，表明间作对香露兜品质的提高有显著促进作用。但以上研究仅对间作模式下香露兜香气成分与环境因子间的关系进行初步探讨，间作模式对香露兜 2AP 物质合成路径，及相关基因表达的作用机制还有待进一步探究。

4 结论

橡胶间作香露兜后，土壤 pH 降低是香露兜叶片酮类、呋喃类、呋喃酮类、烃类和酚类等香气组分减少的主要原因；间作模式在通过降低 pH、提高土壤速效磷和碱解氮含量，显著提高醇类、吡咯类、酯类含量的同时，减少呋喃类、烃类含量。吡咯类物质是香露兜棕香香气的主要来源，间作模式对香露兜品质的提高有显著促进作用。优化和推广橡胶间作香露兜模式有助于提高胶农收益以及相关产业的可持续发展。

参考文献

- [1] 郑定华, 袁淑娜, 陈俊明, 黄坚雄, 潘剑, 李娟, 周立军.

- 橡胶林下间作广金钱草地上部碳氮磷钾生态化学计量特征研究[J]. 热带作物学报, 2017, 38(11): 1997-2002.
- ZHENG D H, YUAN S N, CHEN J M, HUANG J X, PAN J, LI J, ZHOU L J. Ecological stoichiometry of C, N, P, K in above-ground desmodium styracifolium intercropped under different rubber plantations[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(11): 1997-2002. (in Chinese)
- [2] PUSKAS J E, CHIANG K, BARKAKATY B. Natural rubber (NR) biosynthesis: perspectives from polymer chemistry[M]. Sawston Cambridge: Woodhead Publishing, 2014: 30-67.
- [3] WU J, ZENG H, CHEN C, LIU W. Can intercropping with the Chinese medicinal herbs change the water use of the aged rubber trees?[J]. Agricultural Water Management, 2019, 226: 105803.
- [4] 唐瑾暄. 槟榔间作香露兜对土壤理化性质和香露兜挥发性香气成分的影响[D]. 海口: 海南大学, 2021.
- TANG J X. Effect of arecanut and pandan intercropping on soil physicochemical properties and volatile aroma compounds of pandan[D]. Haikou: Hainan University, 2021. (in Chinese)
- [5] 唐瑾暄, 鱼欢, 郭彩权, 秦晓威, 白亭玉, 宗迎. 不同荫蔽度对香露兜光合特征及香气成分的影响[J]. 福建农业学报, 2020, 35(8): 820-829.
- TANG J X, YU H, GUO C Q, QIN X W, BAI T Y, ZONG Y. Effects of shading on photosynthesis and aromatics of pandan (*Pandanus amaryllifolius*) plants[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2020, 35(8): 820-829. (in Chinese)
- [6] SOMTA P, KUSWANTO K, SRINIVES P. The genetics of pandan-like fragrance, 2-acetyl-1-pyrroline, in crops[J]. Agrivita, 2019, 41(1): 10-22.
- [7] BHATTACHARJEE P, KSHIRSAGAR A, SINGHAL R S. Supercritical carbon dioxide extraction of 2-acetyl-1-pyrroline from *Pandanus amaryllifolius* Roxb.[J]. Food Chemistry, 2005, 91(2): 255-259.
- [8] 魏晓东, 张亚东, 赵凌, 路凯, 宋雪梅, 王才林. 稻米香味物质 2-乙酰-1-吡咯啉的形成及其影响因素[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(2): 131-138.
- WEI X D, ZHANG Y D, ZHAO L, LU K, SONG X M, WANG C L. Research progress in biosynthesis and influencing factors of 2-acetyl-1-pyrroline in fragrant rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2022, 36(2): 131-138. (in Chinese)
- [9] LUO H, HE L, LAI R, LIU J, XING P, TANG X. Selenium applications enhance 2-acetyl-1-pyrroline biosynthesis and yield formation of fragrant rice[J]. Agronomy Journal, 2021, 113(1): 250-260.
- [10] 靳晓琳. 缺镁胁迫下柑橘幼苗 cDNA-AFLP 分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- JIN X L. Differential expression of genes in citrus seedlings under magnesium deficiency based on cDNA-AFLP[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese)
- [11] 杨蕾. 盐胁迫下发状念珠藻抗氧化系统及蛋白质、脂质的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2013.
- YANG L. Effects of salt stress on the antioxidation system, proteins and lipids of cyanodacteria *Nostoc flagelliforme*[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [12] 艾鹏睿, 马英杰. 间作模式农田小气候效应对棉花生理生态指标的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(9): 1594-1602.
- AI P R, MA Y J. Effects of field microclimate on physiological and ecological indexes of cotton under intercropping mode[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(9): 1594-1602. (in Chinese)
- [13] 张国林. 茶树-乔木间种对茶叶产量和品质的影响及机理[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.
- ZHANG G L. Mechanism and effect of the tea yield and quality affected by the intercropping trees[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [14] 李枝桦, 王超, 王邵坤, 杨应明, 李觅, 朱海滨. 烟草与香原料植物间栽后烟叶致香物质的变化分析[J]. 分子植物育种, 2014, 12(5): 982-991.
- LI Z H, WANG C, WANG S K, YANG Y M, LI M, ZHU H B. Intercropped with different aromatic plants affect the aroma constituents of tobacco[J]. Molecular Plant Breeding, 2014, 12(5): 982-991. (in Chinese)
- [15] 魏常慧, 刘亚军, 冶秀香, 李越, 马琨. 马铃薯/玉米间作栽培对土壤和作物的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(1): 54-64.
- WEI C H, LIU Y J, YE X X, LI Y, MA K. Effects of intercropping potato with maize on soil an crop[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2017, 43(1): 54-64. (in Chinese)
- [16] 李奇松, 雷卫星, 刘江西, 朱捷文, 史凌珊, 蔡普默, 张见明, 贾小丽. 间作麦冬对茶园土壤理化性质及微生物群落结构的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(12): 3366-3374.
- LI Q S, LEI W X, LIU J X, ZHU J W, SHI L S, CAI P M, ZHANG J M, JIA X L. Effects of intercropping *Ophiopogon japonicus* into tea plantation on its soil physicochemical properties and microbial community structure[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(12): 3366-3374. (in Chinese)
- [17] 李杨辉, 张朝阳, 席琳乔, 廖结安, 王栋, 韩路. 苹果园间作苜蓿绿肥对土壤理化性质的影响[J]. 塔里木大学学报, 2020, 32(3): 72-79.
- LI Y H, ZHANG C Y, XI L Q, LIAO J A, WANG D, HAN

- L. Effects of intercropping alfalfa green manure on soil physical and chemical properties in apple orchard[J]. Journal of Tarim University, 2020, 32(3): 72-79. (in Chinese)
- [18] 王文斌, 吴小平, 尹玉莲, 郭海超, 罗雪华. 水培条件下橡胶树幼苗根系分泌物的 GC-MS 分析[J]. 热带作物学报, 2010, 31(12): 2281-2286.
WANG W B, WU X P, YIN Y L, GUO H C, LUO X H. GC-MS analysis of rubber seedling root exudates with nutrient solution cultivation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(12): 2281-2286. (in Chinese)
- [19] 狄晓双, 武红旗, 贾宏涛, 张文太, 谷海斌, 邵明轩, 盛建东. 新疆主要草地土壤容重与有机碳含量关系模型构建[J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1323-1329.
DI X S, WU H Q, JIA H T, ZHANG W T, GU H B, SHAO M X, SHENG J D. Construction of relationship model between soil bulk density and soil organic carbon content of main grasslands in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(6): 1323-1329. (in Chinese)
- [20] 李冬初, 黄晶, 马常宝, 薛彦东, 高菊生, 王伯仁, 张杨珠, 柳开楼, 韩天富, 张会民. 中国农耕地土壤有机质含量及其与酸碱度和容重关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 252-258.
LI D C, HUANG J, MA C B, XUE Y D, GAO J S, WANG B R, ZHANG Y Z, LIU K L, HAN T F, ZHANG H M. Soil organic matter content and its relationship with pH and bulk density in agricultural areas of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 252-258. (in Chinese)
- [21] 李燕培, 王静, 林佳琦, 肖世祥, 冯斗, 邓英毅, 襍维言. 香蕉园间种甘薯对土壤物理性状和结构的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(5): 205-211.
LI Y P, WANG J, LIN J Q, XIAO S X, FENG D, DENG Y Y, XUAN W Y. Effects of intercropping sweet potato in banana orchard on soil physical properties and structure[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(5): 205-211. (in Chinese)
- [22] 王婷, 王强学, 李永梅, 王自林, 肖靖秀, 范茂攀. 玉米大豆间作对作物根系及土壤团聚体稳定性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(3): 507-515.
WANG T, WANG Q X, LI Y M, WANG Z L, XIAO J X, FAN M P. Effect of maize and soybean intercropping on root system and soil aggregate stability[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2021, 36(3): 507-515. (in Chinese)
- [23] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2003(10): 2176-2183.
PENG X H, ZHANG B, ZHAO Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003(10): 2176-2183. (in Chinese)
- [24] 孟凡, 罗建新, 蔡叶, 余颖, 杨磊, 周万春. 土壤速效磷对烟草生长发育及干物质积累与分配的影响[J]. 作物杂志, 2022(2): 203-210.
MENG F, LUO J X, CAI Y, YU Y, YANG L, ZHOU W C. Effects of soil available phosphorus on tobacco growth and dry matter accumulation and distribution[J]. Crops, 2022(2): 203-210. (in Chinese)
- [25] 刘在民, 刘汉兵, 张梦瑶, 蒋欣梅, 于锡宏, 吴凤芝. 氮肥减施对苜蓿间作大白菜系统下大白菜根际土壤养分及生长的影响[J]. 北方园艺, 2021(23): 21-29.
LIU Z M, LIU H B, ZHANG M Y, JIANG X M, YU X H, WU F Z. Effects of nitrogen reduction on rhizosphere soil nutrients and growth of Chinese cabbage under intercropping of alfalfa and Chinese cabbage[J]. Northern Horticulture, 2021(23): 21-29. (in Chinese)
- [26] 胡志明, 谢龙杰, 段必挺, 吴绍梅, 张儒和, 杨绍帮, 汪林, 杨懋杰. 保山植烟土壤 pH 与有机质组分及离子含量的关系研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(1): 177-183.
HU Z M, XIE L J, DUAN B T, WU S M, ZHANG R H, YANG S B, WANG L, YANG M J. Study on the relationship between pH and organic matter components, ion content in baoshan tobacco-planting soil[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2022, 37(1): 177-183. (in Chinese)
- [27] 刘国顺, 杨超, 祖朝龙, 王芳, 马称心. 皖南烟叶香气成分因子及关联度分析[J]. 土壤通报, 2008(6): 1404-1409.
LIU G S, YANG C, ZU C L, WANG F, MA C X. The aroma components factor and relevancy analysis in tobacco from Wan-nan regions[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008(6): 1404-1409. (in Chinese)
- [28] 李巧玲, 肖忠, 任明波, 韩凤, 胡开治. 间作不同作物对椴子根际土壤微生态的影响[J]. 微生物学通报, 2021, 48(10): 3588-3602.
LI Q L, XIAO Z, REN M B, HAN F, HU K Z. Effect of *gardenia jasminoides* Ellis with different intercropping crops on soil microecology[J]. Microbiology, 2021, 48(10): 3588-3602. (in Chinese)
- [29] 孟自力, 叶美金, 闫延梅, 朱伟, 闫向泉, 朱倩, 倪雪峰. 间作大蒜对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 430-438.
MENG Z L, YE M J, YAN Y M, ZHU W, YAN X Q, ZHU Q, NI X F. Soil microorganism quantity and soil enzyme activity in the wheat-garlic intercropping system[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(5): 430-438. (in Chinese)
- [30] 高柱, 陈璐, 张小丽, 毛积鹏, 樊志鹏, 卢玉鹏, 王小玲. ‘红阳’猕猴桃果园土壤养分与果实品质关系的多元分析

- 及优化方案[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2): 358-367.
- GAO Z, CHEN L, ZHANG X L, MAO J P, FAN Z P, LU Y P, WANG X L. Multivariate analysis and optimization of relationship between soil nutrients and fruit quality in Hongyang kiwifruit orchard[J]. Acta Agriculturae Universitatis Ji-angxiensis(Natural Sciences Edition), 2022, 44(2): 358-367. (in Chinese)
- [31] 郭培培, 黄志, 秦晓威, 陈思平, 鱼欢, 宗迎, 贺书珍. 香露兜不同叶位挥发性成分差异性分析[J]. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2517-2525.
- GUO P P, HUANG Z, QIN X W, CHEN S P, YU H, ZONG Y, HE S Z. Comparative analysis of the volatile components in different leaf position of *Pandanus amaryllifolius* Roxb.[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(12): 2517-2525. (in Chinese)
- [32] BHATTACHARYA A. High-temperature stress and metabolism of secondary metabolites in plants[M]. Salt Lake: Academic Press, 2019: 391-484.
- [33] 鱼欢, 钟壹鸣, 吉训志, 张昂, 唐瑾暄, 李金双, 邓文明, 宗迎, 秦晓威. 槟榔间作香露兜对香露兜光合特性和香气成分的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(4): 779-787.
- YU H, ZHONG Y M, JI X Z, ZHANG A, TANG J X, LI J S, DENG W M, ZONG Y, QIN X W. Effects of arecanut and pandan intercropping on photosynthetic characteristics and aroma components of pandan plants[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(4): 779-787. (in Chinese)
- [34] ZHOU B, CHEN Y, ZENG L, CUI Y, LI J, TANG H, LIU J, TANG J. Soil nutrient deficiency decreases the postharvest quality-related metabolite contents of tea [*Camellia sinensis* (L.) Kuntze] leaves[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 132003.
- [35] FAGERIA N K, NASCENTE A S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production[J]. Advances in Agronomy, 2014, 128: 221-275.
- [36] OKPALA N E, POTCHO M P, AN T, AHATOR S D, DUAN L, TANG X. Low temperature increased the biosynthesis of 2-AP, cooked rice elongation percentage and amylose content percentage in rice[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 93: 102980.
- [37] LUO H, DU B, HE L, HE J, HU L, PAN S, TANG X. Exogenous application of zinc (Zn) at the heading stage regulates 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) biosynthesis in different fragrant rice genotypes[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 19513.
- [38] XIE H, XIE W, PAN S, LIU X, TIAN H, DUAN M, WANG S, TANG X, MO Z. Effects of light quality treatments during the grain filling period on yield, quality, and fragrance in fragrant rice[J]. Agronomy, 2021, 11(3): 531.
- [39] 杨浩, 吴文龙, 闫连飞, 李维林, 吴雅琼. 土壤 pH 值对蓝莓生长和生理特性的影响及其调节方法综述[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(6): 1-8.
- YANG H, WU W L, LU L F, LI W L, WU Y Q. Effects of soil pH value on growth and physiological characteristics of blueberry and its regulation methods: a review[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(6): 1-8. (in Chinese)
- [40] 郭素霞, 程志号, 孙佩光, 孙长君, 郭刚, 吴琼. 海南 17 a 宿根巴西蕉园土壤微生物特征及土壤 pH 周年变化特征分析[J]. 热带作物学报, 2021, 42(8): 2413-2421.
- GUO S X, CHENG Z H, SUN P G, SUN C J, GUO G, WU Q. Soil microbial flora and pH annual change characteristics of 17 years continuous cropping banana field in Hainan, China[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(8): 2413-2421. (in Chinese)
- [41] CUARTERO J, PASCUAL J A, VIVO J, ZBOLAT O, SÁNCHEZ-NAVARRO V, EGEEA-CORTINES M, ZORNOZA R, MENA M M, GARCIA E, ROS M. A first-year melon/cowpea intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 328: 107856.
- [42] YAN S, LIU G. Effect of increasing soil carbon content on tobacco aroma and soil microorganisms[J]. Phytochemistry Letters, 2020, 36: 42-48.
- [43] YAN S, ZHAO J, REN T, LIU G. Correlation between soil microbial communities and tobacco aroma in the presence of different fertilizers[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 151: 112454.
- [44] LI M, ASHRAF U, TIAN H, MO Z, PAN S, ANJUM S A, DUAN M, TANG X. Manganese-induced regulations in growth, yield formation, quality characters, rice aroma and enzyme involved in 2-acetyl-1-pyrroline biosynthesis in fragrant rice[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 103: 167-175.
- [45] 汪耀富, 高华军, 刘国顺, 于建军, 韩富根. 氮、磷、钾肥配施对烤烟化学成分和致香物质含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006(1): 76-81.
- WANG Y F, GAO H J, LIU G S, YU J J, HAN F G. Effects of combining application of N, P, K fertilizers on chemical components and content of aroma constituents in flue-cured tobacco leaves[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006(1): 76-81. (in Chinese)