

# 种植密度和施肥量对林下草珊瑚产量及品质的影响

林 熙, 于耀泓, 盘李进, 李晓垠, 莫彦逊, 邱 权, 苏 艳, 何 茜<sup>①</sup>

(华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 为探究种植密度和施肥量对林下草珊瑚(*Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai)产量和品质的影响,采用裂区试验设计,设置高、中、低3个种植密度水平(分别为25.00、11.11、6.25 m<sup>-2</sup>),不施肥及低和高3个施肥量水平(分别为每株0.5和10 g),通过测定草珊瑚的生长指标和主要药用成分含量及根际土壤养分含量,结合主成分分析和结构方程模型筛选最优种植密度和施肥量组合并明晰影响草珊瑚产量和品质的关键因子。结果表明:在不施肥和低施肥量下,单株干质量随种植密度降低而增加;在中种植密度-高施肥量下,单株干质量最高。低种植密度下的折合产量显著( $P<0.05$ )低于中和高种植密度;在高种植密度-高施肥量下,折合产量、根长、根表面积和根体积极最高;叶长、叶宽、叶周长和叶面积整体在中和低种植密度下较高。整体上看,总黄酮、迷迭香酸和异嗪皮啶单株产量在中种植密度-高施肥量下较高。土壤有机碳、全磷、全氮和速效磷含量均在低种植密度-高施肥量下最高,而土壤碱解氮含量在低种植密度-低施肥量下最高。主成分分析得出前2个主成分的累计贡献率达84.38%,综合评价得出高种植密度-高施肥量和高种植密度-低施肥量为较优组合。结构方程模型显示:种植密度是直接影响草珊瑚产量和品质的重要因子。从经济效益和生态效益考虑,生产上种植草珊瑚宜采用种植密度25.00 m<sup>-2</sup>配施每株5 g复合肥的方式。

**关键词:** 草珊瑚; 种植密度; 施肥量; 产量; 主要药用成分

中图分类号: Q945.3; S567.1<sup>+</sup>9; S606<sup>+</sup>.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)02-0052-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.02.06

**Effects of planting density and fertilization amount on yield and quality of understory *Sarcandra glabra*** LIN Xi, YU Yaohong, PAN Lijin, LI Xiaoyin, MO Yanxun, QIU Quan, SU Yan, HE Qian<sup>①</sup> (College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(2): 52-61

**Abstract:** To investigate the effects of planting density and fertilization amount on yield and quality of understory *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai, a split-plot experimental design was employed, three planting density levels namely high, medium, and low (corresponding to 25.00, 11.11, and 6.25 m<sup>-2</sup>, respectively) were set up, three fertilization amount levels namely non-fertilization, low, and high (corresponding to 0, 5, and 10 g per plant, respectively) were established, and the optimal combination of planting density and fertilization amount was screened out and the key factors affecting yield and quality of *S. glabra* were clarified by measuring the growth indexes, main medicinal component contents, and rhizosphere soil nutrient contents of *S. glabra*, combined with principal component analysis and structural equation model. The results show that under non-fertilization and low fertilization amount, the dry mass per plant increases with the decrease of planting density; the dry mass per plant is the highest under medium planting density-high fertilization amount. The converted yield under low planting density is significantly ( $P<0.05$ ) lower than that under medium and high planting densities; under high planting density-high fertilization amount, the converted yield, root length, root surface area, and root volume are

收稿日期: 2024-07-12

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(32001246); 广东省林业科技创新项目(2021KJCX011)

作者简介: 林 熙(1999—),女,广东汕头人,硕士研究生,主要从事林下经济研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: heqian69@126.com

引用格式: 林 熙, 于耀泓, 盘李进, 等. 种植密度和施肥量对林下草珊瑚产量及品质的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(2): 52-61.

all the highest; the leaf length, leaf width, leaf circumference, and leaf area are relatively high under medium and low planting densities in general. Overall, the yields of total flavonoids, rosmarinic acid, and isofraxidin per plant are relatively high under medium planting density-high fertilization amount. The contents of soil organic carbon, total phosphorus, total nitrogen, and available phosphorus are all the highest under low planting density-high fertilization amount, while the soil alkali-hydrolyzable nitrogen content is the highest under low planting density-low fertilization amount. The principal component analysis reveals that the cumulative contribution rate of the first two principal components reaches 84.38%, and the comprehensive evaluation indicates that high planting density-high fertilization amount and high planting density-low fertilization amount are the optimal combinations. The structural equation model shows that planting density is an important factor directly affecting the yield and quality of *S. glabra*. Considering both economic and ecological benefits, a planting density of 25.00 m<sup>-2</sup> with 5 g compound fertilizer per plant are recommended for the cultivation of *S. glabra* in production.

**Key words:** *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai; planting density; fertilization amount; yield; main medicinal component

草珊瑚[*Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai]隶属于金粟兰科(Chloranthaceae)草珊瑚属(*Sarcandra* Gardner),为传统药用植物,全株可入药,有效成分为黄酮类、有机酸类(如迷迭香酸)、香豆素类(如异嗪皮啶)等<sup>[1-2]</sup>。草珊瑚还具有较高的实用价值,可制作草珊瑚茶、草珊瑚含片和草珊瑚牙膏等产品<sup>[3-4]</sup>。但目前草珊瑚产量低、市场缺口大,极具开发潜力<sup>[5-6]</sup>。林下种植是草珊瑚仿野生栽培的一种方式<sup>[7]</sup>,不仅能够提高林下生物多样性,促进生态恢复<sup>[8]</sup>,还能充分利用林地资源,提升经济效益,助力林业可持续发展。尽管近年来草珊瑚的人工种植研究已有一定进展,但这些研究主要集中于活性成分药理方面<sup>[9-11]</sup>,林下草珊瑚栽培技术仍需进一步优化。因此,探讨提升草珊瑚产量和品质的人工栽培技术尤为关键。

施肥和种植密度是影响植物生长的重要因子。种植密度影响植物对水分、肥料、光照和温度等环境因子的利用效率,从而影响植物的产量和品质。合理的种植密度是实现药用植物优质高产的关键之一<sup>[12]</sup>。“互惠产量定律”表明种植密度与产量之间存在复杂的非线性关系<sup>[13]</sup>。Gerami等<sup>[14]</sup>研究表明较高的种植密度可提高牛至(*Origanum vulgare* Linn.)的精油产量及单位面积产量。王雁丽等<sup>[15]</sup>研究发现,较小的行距会加剧春箭筈豌豆(*Vicia sativa* Linn.)的个体竞争,导致植株营养生长过度,株高增加,种子产量下降。以上研究结果表明种植密度对不同植物产量的影响不同。施肥不仅影响植物的生长和产量,还通过调控生物活性成分的合成影响植物的品质。同时,种植密度和施肥处理之间存在明显的交

互作用,对植物生长和产量有显著影响<sup>[16]</sup>。Ayyat<sup>[17]</sup>指出高种植密度和施肥处理显著提高了葛缕子(*Carum carvi* Linn.)的生长、果实产量和产油量;陈斌<sup>[18]</sup>的研究结果显示在中等种植密度下施用氮肥会影响甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.)主根的产量和质量。总而言之,种植密度和施肥是影响药用植物生长和活性成分合成的关键因子,且二者间存在复杂的相互作用<sup>[19-20]</sup>,可以通过调控种植密度和均衡施肥来提高植物的产量和品质。

作者所在课题组前期研究发现,草珊瑚在郁闭度为0.7~0.8的红锥(*Castanopsis hystrix* Hook. f. et Thomson ex A. DC.)林下生长较好。因此,本研究在红锥林下种植草珊瑚,采用裂区试验设计,研究种植密度和施肥量对草珊瑚生长发育、干物质积累、产量和主要药用成分(总黄酮、迷迭香酸、异嗪皮啶)含量的影响,旨在探讨林下草珊瑚最佳种植密度和施肥量,为草珊瑚优质高产种植提供理论依据,并为提高林下种植草珊瑚的经济效益提供数据支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广东省龙眼洞林场帽峰山(北纬23°15'40"~23°19'46"、东经113°22'15"~113°29'11")的林下经济示范基地,属亚热带季风气候,季风环流盛行,热量丰富、雨量充沛、霜雪稀少。帽峰山地属陡坡低山丘陵,坡向为西北方向,坡度为16°,土壤为赤红壤,呈棕黄或灰黄色,土层较厚。林地土壤酸碱度为pH 4.1,有机碳含量19.09 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量1.32

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷含量  $0.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮含量  $61.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷含量  $0.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。实验林分为红锥人工纯林, 郁闭度为  $0.7 \sim 0.8$ , 林分密度为  $349.65 \text{ hm}^{-2}$ , 植株胸径 ( $30.94 \pm 3.12$ ) cm、树高 ( $27.04 \pm 1.86$ ) m。

## 1.2 研究材料和实验设计

2023年3月, 在红锥林下种植生长发育良好、长势基本一致〔株高 ( $22.15 \pm 0.12$ ) cm、地径 ( $2.32 \pm 0.13$ ) mm〕且株龄为2 a的草珊瑚植株。采用裂区试验设计, 草珊瑚种植密度设置3个水平, 即高、中、低, 分别为  $25.00$ 、 $11.11$ 、 $6.25 \text{ m}^{-2}$ , 株距(行距与株距相同)分别为  $20$ 、 $30$ 、 $40$  cm; 施肥量设置3个水平, 即不施肥、低、高, 分别为每株  $0$ 、 $5$ 、 $10$  g。共9个处理, 每个处理3个小区(面积  $2 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ), 共27个小区。肥料为雅苒国际集团的苗乐复合肥料(硫酸钾型  $15-15-15$ ), 在处理当天一次性施用。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 生长指标测定

处理3个月(2023年6月), 在每个小区选取长势基本一致的30株草珊瑚进行编号。每隔3个月, 使用直尺(精度  $0.01$  cm)测量株高, 使用游标卡尺(精度  $0.01$  mm)测量地径, 每株测量3次。处理9个月(2023年12月), 每个小区随机选取长势基本一致的5株草珊瑚, 先用蒸馏水洗净, 再用吸水纸吸干多余水分, 使用 ScanMaker i800 plus 扫描仪(上海中晶科技有限公司)测量每株根长、根表面积、根体积以及叶长、叶宽、叶周长、叶面积; 之后于 ( $105 \pm 5$ )  $^{\circ}\text{C}$  杀青1 h,  $60$   $^{\circ}\text{C}$  烘干至恒质量, 使用分析天平(精度  $0.1$  mg)分别称量每株根、茎、叶的干质量, 三者之和为单株干质量。计算每公顷潜在产量, 即折合产量, 计算公式为折合产量 = 种植密度  $\times$  单株干质量, 以  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  计。

### 1.3.2 药用成分含量测定

将根、茎、叶干燥样品分别研磨成粉后过60目筛; 精密称取  $1.00$  g, 置于具塞锥形瓶中, 加入  $25$  mL 甲醇浸提  $0.5$  h, 于  $50$   $^{\circ}\text{C}$  下超声(功率为  $250$  W)提取  $10$  min; 冷却至室温, 经微孔滤膜(孔径  $0.22$   $\mu\text{m}$ )过滤后转移至进样瓶; 使用 Agilent 1260 高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司)测定迷迭香酸和异嗪皮啶含量。色谱条件: 高效液相色谱二极管阵列(HPLC-DAD), ZORBAX SB-C<sub>18</sub> 反相色谱柱( $150 \text{ mm} \times 4.6 \text{ mm}$ ,  $5$   $\mu\text{m}$ )(美国 Agilent 公司); 以体积分数  $0.1\%$  磷酸溶液为流动相 A、乙腈为流动相 B 进行梯度洗脱, 洗脱程序为  $0 \sim 9$  min,  $20\%$

A;  $9 \sim 10$  min, 机器自动清洗纠正;  $10 \sim 15$  min,  $40\%$  A。柱温  $40$   $^{\circ}\text{C}$ , 流速  $0.6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 进样量  $1$   $\mu\text{L}$ , 吸收波长  $344$  nm, 总进样时间  $15$  min<sup>[21]</sup>。该色谱条件下, 迷迭香酸和异嗪皮啶的保留时间分别为  $11.432$  和  $7.981$  min。使用苏州格锐思生物科技有限公司生产的 G0118W48 总黄酮(TF)试剂盒测定草珊瑚中总黄酮含量。根据迷迭香酸、异嗪皮啶和总黄酮含量计算这3种药用成分的单株产量。设置3个技术重复。

### 1.3.3 土壤养分含量测定

2023年12月, 在取植株样品的同时, 采用抖落法收集草珊瑚根际土壤样品, 去除杂质后置于阴凉处风干并过筛(孔径  $0.25$  mm), 用于测定土壤养分含量。其中, 土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法<sup>[22]30-34</sup>测定, 土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法<sup>[22]42-49</sup>测定, 土壤全磷含量采用钼锑抗分光光度法<sup>[22]76-79</sup>测定, 土壤碱解氮含量采用碱液扩散法<sup>[22]56-58</sup>测定, 土壤速效磷含量采用钼锑抗比色法<sup>[22]86-87</sup>测定。设置3个技术重复。

## 1.4 数据处理

使用 EXCEL 10.0 软件对数据进行整理, 使用 SPSS 26.0 软件进行方差分析、多重比较(Duncan's 法)和主成分分析。使用 R 4.2.2 软件中的 plsmp 包对指标进行偏最小二乘法路径分析并建模。使用 Origin 2023 软件绘制图表。

## 2 结果和分析

### 2.1 种植密度和施肥量对林下草珊瑚生长的影响

#### 2.1.1 对株高和地径的影响

种植密度和施肥量及二者交互作用均对林下草珊瑚株高无显著影响。种植密度和施肥量均对林下草珊瑚地径具有极显著 ( $P < 0.01$ ) 影响, 二者交互作用对地径无显著影响。

结果(表1)显示: 在高种植密度 ( $25.00 \text{ m}^{-2}$ ) 下, 3个处理时间的草珊瑚株高随施肥量升高而增加; 在中种植密度 ( $11.11 \text{ m}^{-2}$ ) 下, 处理9个月的草珊瑚株高随施肥量升高而增加; 在低种植密度 ( $6.25 \text{ m}^{-2}$ ) 下, 处理6和9个月的草珊瑚株高随施肥量升高而增加。在相同施肥量下, 3个处理时间的草珊瑚株高随种植密度减小波动变化。整体来看, 低种植密度-高施肥量(每株  $10$  g) 下的草珊瑚株高在3个处理时间均最高。

由表1还可见: 在相同种植密度下, 3个处理时间的草珊瑚地径整体在低施肥量(每株  $5$  g) 下最小。

在相同施肥量下, 处理 3 和 6 个月的草珊瑚地径整体随种植密度降低而增大; 处理 9 个月的草珊瑚地径均

在中种植密度下最大。在处理 9 个月后, 中种植密度-不施肥下的草珊瑚地径最大。

表 1 不同种植密度和施肥量对林下草珊瑚株高和地径的影响 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>  
 Table 1 Effects of different planting densities and fertilization amounts on plant height and ground diameter of understory *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	不同处理时间的株高/cm Plant height at different treatment times			不同处理时间的地径/mm Ground diameter at different treatment times		
	3 个月 Three months	6 个月 Six months	9 个月 Nine months	3 个月 Three months	6 个月 Six months	9 个月 Nine months
D1F0	24.13±0.51abc	27.30±0.35c	29.19±0.52b	2.41±0.16bc	2.58±0.21b	2.69±0.18bcd
D1F1	24.31±0.68abc	31.08±0.58a	32.95±0.51a	2.35±0.06c	2.68±0.70ab	2.83±0.12abc
D1F2	25.00±0.21ab	31.11±0.87a	33.02±0.51a	2.40±0.05bc	2.56±0.16b	2.43±0.36d
D2F0	23.29±0.48bc	28.59±0.21bc	31.54±0.20a	2.66±0.15ab	2.76±0.16ab	3.05±0.11a
D2F1	24.67±0.26abc	30.54±0.10ab	32.30±0.95a	2.45±0.08abc	2.75±0.05ab	2.92±0.01abc
D2F2	23.31±0.69bc	30.18±0.69ab	32.67±0.44a	2.75±0.08a	2.91±0.07ab	3.04±0.05ab
D3F0	24.10±0.31abc	30.79±0.25a	31.75±0.24a	2.70±0.07ab	2.97±0.05a	2.99±0.06abc
D3F1	23.09±0.63c	31.70±0.23a	32.91±0.57a	2.49±0.07abc	2.54±0.10b	2.65±0.06cd
D3F2	26.23±0.26a	32.21±0.04a	33.57±0.87a	2.61±0.60abc	2.95±0.17a	3.02±0.17ab

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示在不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different treatments.

<sup>2)</sup> D1: 高种植密度 High planting density ( $25.00 \text{ m}^{-2}$ ); D2: 中种植密度 Medium planting density ( $11.11 \text{ m}^{-2}$ ); D3: 低种植密度 Low planting density ( $6.25 \text{ m}^{-2}$ ). F0: 不施肥 Non-fertilization; F1: 低施肥量 (每株 5 g) Low fertilization amount (5 g per plant); F2: 高施肥量 (每株 10 g) High fertilization amount (10 g per plant).

2.1.2 对干质量和产量的影响 结果(表 2)显示: 种植密度对林下草珊瑚折合产量具有极显著影响, 施肥量对林下草珊瑚叶干质量、单株干质量和折合产量具有极显著影响, 种植密度和施肥量交互作用对林下草珊瑚根干质量和折合产量分别具有显著 ( $P < 0.05$ ) 和极显著影响。

在高和中种植密度下, 根干质量随施肥量增加而增加, 而在低种植密度下恰好相反; 在相同施肥量下, 根干质量随种植密度减小波动变化; 在中种植密度-高施肥量下, 根干质量最大。在低种植密度下, 茎干质量随施肥量升高而增加; 在不施肥情况下, 根长随种植密度降低而减小; 在相同施肥量下, 茎干质量随种植密度降低波动变化; 在中种植密度-高施肥量下, 茎干质量最大, 且显著大于其他处理。在高和中种植密度下, 叶干质量随施肥量升高而增加; 在同一施肥量下, 叶干质量均在中种植密度下最大; 在中种植密度-高施肥量下, 叶干质量最大。在高和中种植密度下, 单株干质量随施肥量升高而增加; 在不施肥和低施肥量下, 单株干质量随种植密度降低而增加; 在中种植密度-高施肥量下, 单株干质量最大, 且显著大于其他处理。在高和中种植密度下, 折合产量随施肥量升高而显著增加; 在同一施肥量下, 折合产量

随种植密度降低显著减少; 在高种植密度-高施肥量下, 折合产量显著高于其他处理。

2.1.3 对根系和叶片形态的影响 结果(表 3)显示: 种植密度和施肥量及二者交互作用整体上对林下草珊瑚根系和叶片形态具有显著或极显著影响。

在高种植密度下, 根长、根表面积和根体积随施肥量升高而增加; 在不施肥情况下, 根长随种植密度降低而减小; 在同一施肥量下, 根表面积随种植密度降低而减小; 在高施肥量下, 根体积随种植密度降低而减小; 在中种植密度-高施肥量下, 根长、根表面积和根体积均最大。在高种植密度下, 叶长随施肥量升高而增加; 在低种植密度下, 叶长随施肥量升高而减小; 在相同种植密度下, 叶宽随施肥量升高而增加; 在高和低种植密度下, 叶面积随施肥量升高而增加, 叶周长随施肥量升高先减小后增加。在不施肥情况下, 叶长随种植密度降低显著增加; 在相同施肥量下, 叶宽随种植密度降低而增加; 在不施肥和高施肥量下, 叶周长随种植密度降低而增加; 在低和高施肥量下, 叶面积随种植密度降低而增加。在中种植密度-高施肥量下, 叶长最大; 在低种植密度-高施肥量下, 叶宽和叶面积最大; 在低种植密度-不施肥情况下, 叶周长最大。

表2 不同种植密度和施肥量对林下草珊瑚干质量和产量的影响( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 2 Effects of different planting densities and fertilization amounts on dry mass and yield of understory *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	根干质量/g Dry mass of root	茎干质量/g Dry mass of stem	叶干质量/g Dry mass of leaf	单株干质量/g Dry mass per plant	折合产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Converted yield
D1F0	0.79±0.05bc	0.64±0.01d	0.67±0.02d	2.10±0.06e	524.67±13.79c
D1F1	0.84±0.02bc	1.03±0.03b	0.98±0.08bc	2.86±0.06bc	714.08±14.27b
D1F2	0.96±0.07ab	0.94±0.03bc	1.14±0.02abc	3.04±0.10b	760.58±25.24a
D2F0	0.66±0.04c	0.86±0.04bcd	0.94±0.06c	2.46±0.06d	273.48±6.83f
D2F1	0.89±0.06b	0.79±0.19cd	1.24±0.01a	2.93±0.18bc	280.64±19.63e
D2F2	1.11±0.16a	1.38±1.17a	1.25±0.25a	3.74±0.19a	415.63±20.82d
D3F0	0.97±0.02ab	0.79±0.13cd	0.93±0.06c	2.68±0.14cd	167.67±8.85g
D3F1	0.90±0.06b	0.87±0.04bcd	1.20±0.08ab	2.96±0.14bc	184.88±8.79g
D3F2	0.81±0.11bc	0.90±0.03bc	1.07±0.08abc	2.77±0.04bc	173.35±2.72g
<i>P<sub>D</sub></i>	NS	NS	NS	NS	**
<i>P<sub>F</sub></i>	NS	NS	**	**	**
<i>P<sub>D×F</sub></i>	*	NS	NS	NS	**

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示在不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ( $P<0.05$ ) between different treatments.

<sup>2)</sup> D1: 高种植密度 High planting density (25.00 m<sup>-2</sup>); D2: 中种植密度 Medium planting density (11.11 m<sup>-2</sup>); D3: 低种植密度 Low planting density (6.25 m<sup>-2</sup>). F0: 不施肥 Non-fertilization; F1: 低施肥量 (每株 5 g) Low fertilization amount (5 g per plant); F2: 高施肥量 (每株 10 g) High fertilization amount (10 g per plant). *P<sub>D</sub>*, *P<sub>F</sub>*, *P<sub>D×F</sub>*: 分别表示种植密度、施肥量和二者交互作用的显著性水平 Representing the significance levels for planting density, fertilization amount, and their interaction. NS: 不显著 Non-significant; \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ .

表3 不同种植密度和施肥量对林下草珊瑚根系和叶片形态的影响( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 3 Effects of different planting densities and fertilization amounts on root and leaf morphologies of understory *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	根长/cm Root length	根表面积/mm <sup>2</sup> Root surface area	根体积/cm <sup>3</sup> Root volume	叶长/mm Leaf length	叶宽/mm Leaf width	叶周长/mm Leaf circumference	叶面积/mm <sup>2</sup> Leaf area
D1F0	295.45±22.76d	140.69±4.98de	4.05±0.10bc	49.55±1.45e	26.62±1.24c	308.50±20.34d	782.23±50.94c
D1F1	334.77±14.88bcd	174.44±10.04ab	5.66±0.38a	64.45±0.46d	26.89±1.95c	287.90±2.23d	995.33±31.60b
D1F2	387.46±14.26a	180.61±11.25a	5.82±0.51a	70.87±0.44b	28.14±2.24c	321.25±11.31c	1 073.26±1.90b
D2F0	245.10±17.11e	131.31±4.89ef	3.40±0.13c	69.29±1.73bc	28.63±2.04c	324.59±15.79c	1 110.10±63.45b
D2F1	369.66±13.20ab	165.81±11.72abc	4.48±0.28b	68.50±1.03bcd	28.94±0.21c	377.27±10.85ab	1 085.11±55.57b
D2F2	349.51±28.13abc	157.28±2.46bcd	5.47±0.40a	77.27±1.34a	32.55±1.07ab	335.45±23.85c	1 125.84±88.65b
D3F0	225.42±14.88e	121.13±5.35f	3.42±0.19c	74.99±2.75a	29.88±0.42bc	404.52±11.13a	1 053.39±52.86b
D3F1	315.23±11.76cd	153.10±10.37cd	5.55±0.38a	66.42±1.26cd	32.51±0.91ab	336.45±10.32c	1 127.20±59.64b
D3F2	355.28±19.43abc	146.39±8.40de	4.39±0.14b	65.89±1.84cd	35.34±1.27a	371.23±12.79b	1 268.67±95.80a
<i>P<sub>D</sub></i>	*	*	**	**	**	**	*
<i>P<sub>F</sub></i>	**	**	**	**	**	NS	**
<i>P<sub>D×F</sub></i>	*	NS	**	**	NS	**	*

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示在不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ( $P<0.05$ ) between different treatments.

<sup>2)</sup> D1: 高种植密度 High planting density (25.00 m<sup>-2</sup>); D2: 中种植密度 Medium planting density (11.11 m<sup>-2</sup>); D3: 低种植密度 Low planting density (6.25 m<sup>-2</sup>). F0: 不施肥 Non-fertilization; F1: 低施肥量 (每株 5 g) Low fertilization amount (5 g per plant); F2: 高施肥量 (每株 10 g) High fertilization amount (10 g per plant). *P<sub>D</sub>*, *P<sub>F</sub>*, *P<sub>D×F</sub>*: 分别表示种植密度、施肥量和二者交互作用的显著性水平 Representing the significance levels for planting density, fertilization amount, and their interaction. NS: 不显著 Non-significant; \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ .

## 2.2 种植密度和施肥量对林下草珊瑚主要药用成分含量和单株产量的影响

结果(表4)显示:种植密度和施肥量及二者交互作用对林下草珊瑚总黄酮、迷迭香酸和异嗪皮啶含量及单株产量均具有极显著 ( $P<0.01$ ) 影响。

在高和低种植密度(分别为 25.00 和 6.25 m<sup>-2</sup>)下,总黄酮含量随施肥量升高而增加;在中种植密度(11.11 m<sup>-2</sup>)下,迷迭香酸含量随施肥量升高而显著 ( $P<0.05$ ) 增加;在高种植密度下,异嗪皮啶含量随施肥量升高而显著增加。在高施肥量(每株 10 g)下,

总黄酮含量随种植密度降低而减少;在低(每株 5 g)和高施肥量下,迷迭香酸含量随种植密度降低而减少;在高施肥量下,异嗪皮啉含量随种植密度降低而显著减少。在中种植密度-低施肥量下,总黄酮含量最高;在高种植密度-低施肥量下,迷迭香酸含量最高;在高种植密度-高施肥量下,异嗪皮啉含量最高。

在相同种植密度下,总黄酮、迷迭香酸和异嗪皮

啉单株产量整体上随施肥量升高而增加;在相同施肥量下,总黄酮单株产量均在中种植密度下高于高和低种植密度;在低施肥量下,迷迭香酸单株产量随种植密度降低而减少;在高施肥量下,异嗪皮啉单株产量随种植密度降低而减少。在中种植密度-高施肥量下,总黄酮和迷迭香酸单株产量均最高;在高种植密度-高施肥量下,异嗪皮啉单株产量最高。

表 4 不同种植密度和施肥量对林下草珊瑚主要药用成分含量和单株产量的影响( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>  
 Table 4 Effects of planting densities and fertilization amounts on contents and yields per plant of main medicinal components of understory *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	含量/(mg · g <sup>-1</sup> ) Content			单株产量/mg Yield per plant		
	总黄酮 Total flavonoids	迷迭香酸 Rosmarinic acid	异嗪皮啉 Isofraxidin	总黄酮 Total flavonoids	迷迭香酸 Rosmarinic acid	异嗪皮啉 Isofraxidin
D1F0	34.38±2.56de	1.63±0.03f	1.16±0.03d	72.15±5.38f	3.43±0.07f	2.44±0.06h
D1F1	46.25±3.30bc	4.79±0.20a	1.43±0.02bc	132.09±9.42c	13.67±0.57b	4.08±0.06d
D1F2	49.33±0.85ab	4.23±0.11b	1.69±0.01a	150.07±2.59b	12.87±0.34c	5.15±0.04a
D2F0	36.86±1.72d	1.37±0.01g	1.24±0.07d	90.73±4.23e	3.33±0.03f	3.05±0.17f
D2F1	51.74±2.27a	2.73±0.15d	1.63±0.03a	151.54±6.64b	7.98±0.45d	4.78±0.08b
D2F2	45.03±1.69bc	4.04±0.09b	1.36±0.04c	168.42±6.31a	15.12±0.35a	5.07±0.15a
D3F0	31.08±1.93e	2.16±0.02e	1.04±0.01e	83.37±5.17ef	5.80±0.04e	2.79±0.03g
D3F1	37.23±1.10d	2.12±0.05e	1.48±0.05b	110.13±3.25d	6.28±0.15e	4.37±0.15c
D3F2	42.46±0.99c	2.99±0.06c	1.23±0.03d	117.77±2.75d	8.30±0.17d	3.41±0.09e
<i>P<sub>D</sub></i>	**	**	**	**	**	**
<i>P<sub>F</sub></i>	**	**	**	**	**	**
<i>P<sub>D×F</sub></i>	**	**	**	**	**	**

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示在不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different treatments.

<sup>2)</sup> D1: 高种植密度 High planting density (25.00 m<sup>-2</sup>); D2: 中种植密度 Medium planting density (11.11 m<sup>-2</sup>); D3: 低种植密度 Low planting density (6.25 m<sup>-2</sup>). F0: 不施肥 Non-fertilization; F1: 低施肥量(每株 5 g) Low fertilization amount (5 g per plant); F2: 高施肥量(每株 10 g) High fertilization amount (10 g per plant). *P<sub>D</sub>*, *P<sub>F</sub>*, *P<sub>D×F</sub>*: 分别表示种植密度、施肥量和二者交互作用的显著性水平 Representing the significance levels for planting density, fertilization amount, and their interaction. \*\*:  $P < 0.01$ .

### 2.3 种植密度和施肥量对林下草珊瑚根际土壤养分含量的影响

结果(表 5)显示:除种植密度和施肥量交互作用对林下草珊瑚根际土壤有机碳含量影响不显著外,种植密度和施肥量及二者交互作用对林下草珊瑚根际土壤有机碳、全磷、全氮、速效磷、碱解氮含量存在极显著( $P < 0.01$ )影响。

在相同种植密度下,土壤有机碳含量随施肥量增加而显著( $P < 0.05$ )增加;在相同施肥量下,土壤有机碳含量随种植密度降低整体显著增加。在高和低种植密度(分别为 25.00 和 6.25 m<sup>-2</sup>)下,土壤全磷含量随施肥量升高而增加;在低施肥量(每株 5 g)下,土壤全磷含量随种植密度降低而增加。在高种植密度下,土壤全氮含量随施肥量升高而增加;在相同施肥量下,土壤全氮含量随种植密度降低整体显著升高。

在相同种植密度下,土壤速效磷含量随施肥量升高而显著增加;在相同施肥量下,土壤速效磷含量随种植密度降低而增加。在相同种植密度下,土壤碱解氮含量均在低施肥量下高于不施肥和高施肥量(每株 10 g);在不施肥和高施肥量下,土壤碱解氮含量随种植密度降低而增加。在低种植密度-高施肥量下,土壤有机碳、全磷、全氮和速效磷含量均最高;而在低种植密度-低施肥量下,土壤碱解氮含量最高。

### 2.4 林下草珊瑚关键指标的主成分分析和综合评价

依据上述研究结果和生产实践关注点,并结合 KMO 值和 Bartlett 检验结果,筛选出株高( $X_1$ )、折合产量( $X_2$ )、根表面积( $X_3$ )、总黄酮含量( $X_4$ )、迷迭香酸含量( $X_5$ )、异嗪皮啉含量( $X_6$ )、土壤有机碳含量( $X_7$ )、土壤全磷含量( $X_8$ )共 8 个指标进行主成分分析(KMO=0.656,  $P = 0.002$ )。结果(表 6)显示:第 1

和第2主成分的特征值分别为4.903、1.847,累计贡献率达84.38%,表明前2个主成分可以较好地反映草珊瑚的基本特征。根表面积和折合产量在第1主成分中发挥重要作用,其特征向量分别为0.921和0.901;土壤有机碳含量、土壤全磷含量和株高在第2主成分中发挥重要作用,其特征向量分别为0.940、0.876和0.829。

根据以上关键指标的特征向量,得到主成分1( $Y_1$ )和主成分2( $Y_2$ )的线性方程,分别为 $Y_1 = 0.16X_1 + 0.44X_2 + 0.42X_3 + 0.35X_4 + 0.36X_5 + 0.33X_6 + 0.06X_7 + 0.06X_8$ 和 $Y_2 = 0.61X_1 - 0.26X_2 + 0.25X_3 + 0.35X_4 + 0.24X_5 + 0.35X_6 + 0.69X_7 + 0.64X_8$ ,根据线性方程得到各处理在2个主成分中的得分,最后计算出各处理的综合得分,结果见表7。结果显示:高种植密度-高施

肥量处理和高种植密度-低施肥量处理的综合得分明显高于其他处理。

## 2.5 结构方程模型

为了更好地分析不同种植密度和施肥量对林下草珊瑚产量和品质的直接和间接影响,构建了偏最小二乘法结构方程模型(PLS-SEM),模型的Gof指数为0.751,表明拟合度较高。结果(图1)显示:种植密度直接影响草珊瑚的产量和品质,且路径系数均为0.982,表现为正效应,分别在0.001和0.01水平上影响显著。此外,种植密度还通过影响根系形态进而影响草珊瑚的产量和品质。施肥量则通过影响根系形态进而影响草珊瑚的产量和品质,并通过调节土壤养分影响草珊瑚品质。除此之外,土壤养分也能调节根系形态,进而影响草珊瑚的产量和品质。

表5 不同种植密度和施肥量对林下草珊瑚根际土壤养分含量的影响( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 5 Effects of different planting densities and fertilization amounts on rhizosphere soil nutrient content of understory *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	有机碳含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Organic carbon content	全磷含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total phosphorus content	全氮含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total nitrogen content	速效磷含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available phosphorus content	碱解氮含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Alkali-hydrolyzable nitrogen content
D1F0	9.88±0.63h	0.28±0.01b	0.74±0.02e	0.11±0.01f	51.80±1.20f
D1F1	17.41±0.29e	0.31±0.03b	1.47±0.03d	0.17±0.02de	89.60±1.71b
D1F2	18.82±0.64d	0.37±0.01a	1.66±0.11c	0.60±0.01b	64.53±0.60e
D2F0	13.91±0.18g	0.20±0.01d	1.66±0.04c	0.14±0.02ef	65.07±3.03e
D2F1	19.57±0.48cd	0.36±0.01a	1.61±0.04c	0.19±0.01d	72.40±2.45cd
D2F2	20.84±0.63b	0.24±0.02c	1.90±0.02b	1.18±0.03a	69.77±1.14de
D3F0	15.60±0.82f	0.29±0.02b	1.85±0.02b	0.14±0.02ef	78.40±2.69c
D3F1	20.39±0.81bc	0.38±0.01a	1.70±0.02c	0.27±0.01c	118.17±7.85a
D3F2	23.08±0.19a	0.39±0.01a	2.65±0.07a	1.19±0.01a	78.93±1.92c
$P_D$	**	**	**	**	**
$P_F$	**	**	**	**	**
$P_{D \times F}$	NS	**	**	**	**

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示在不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different treatments.

<sup>2)</sup> D1: 高种植密度 High planting density (25.00 m<sup>-2</sup>); D2: 中种植密度 Medium planting density (11.11 m<sup>-2</sup>); D3: 低种植密度 Low planting density (6.25 m<sup>-2</sup>). F0: 不施肥 Non-fertilization; F1: 低施肥量(每株5g) Low fertilization amount (5 g per plant); F2: 高施肥量(每株10g) High fertilization amount (10 g per plant).  $P_D, P_F, P_{D \times F}$ : 分别表示种植密度、施肥量和二者交互作用的显著性水平 Representing the significance levels for planting density, fertilization amount, and their interaction. NS: 不显著 Non-significant; \*\*:  $P < 0.01$ .

表6 林下草珊瑚关键指标的主成分分析

Table 6 Principal component analysis of key indexes of understory *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai

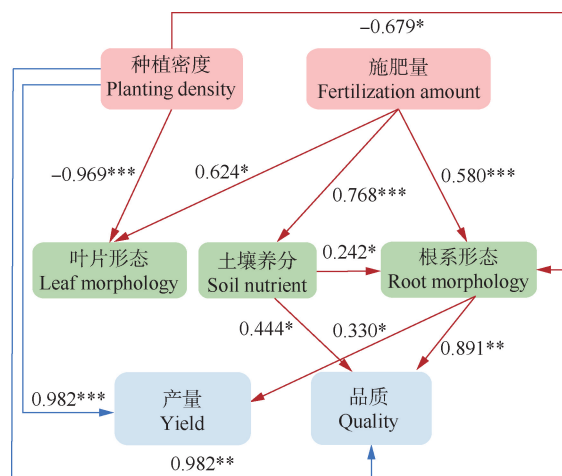
主成分 Principal component	关键指标的特征向量 <sup>1)</sup> Eigenvector of key indexes <sup>1)</sup>								特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	$h$	$y$	$A$	$w_{if}$	$w_{ra}$	$w_i$	$w_{soc}$	$w_{stp}$			
1	0.335	0.901	0.921	0.784	0.805	0.736	0.131	0.141	4.903	45.31	45.31
2	0.829	-0.355	0.339	0.464	0.329	0.471	0.940	0.876	1.847	39.07	84.38

<sup>1)</sup>  $h$ : 株高 Plant height;  $y$ : 折合产量 Converted yield;  $A$ : 根表面积 Root surface area;  $w_{if}$ : 总黄酮含量 Total flavonoids content;  $w_{ra}$ : 迷迭香酸含量 Rosmarinic acid content;  $w_i$ : 异嗟皮啉含量 Isofraxidin content;  $w_{soc}$ : 土壤有机碳含量 Soil organic carbon content;  $w_{stp}$ : 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content.

表 7 不同种植密度和施肥量处理林下草珊瑚的综合得分  
Table 7 Comprehensive scores of understory *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai treated by different planting densities and fertilization amounts

处理 <sup>1)</sup> Treatment <sup>1)</sup>	在各主成分中的得分 Score in each principal component		综合得分 Comprehensive score	排序 Sort
	1	2		
D1F0	-1.653	-3.818	-1.894	8
D1F1	2.086	1.141	1.542	2
D1F2	2.729	2.304	2.205	1
D2F0	-1.718	-2.414	-1.610	7
D2F1	1.065	2.093	1.136	3
D2F2	0.716	0.590	0.575	4
D3F0	-2.379	-2.025	-1.926	9
D3F1	-0.408	1.557	0.109	6
D3F2	-0.438	1.811	0.150	5

<sup>1)</sup> D1: 高种植密度 High planting density (25.00 m<sup>-2</sup>); D2: 中种植密度 Medium planting density (11.11 m<sup>-2</sup>); D3: 低种植密度 Low planting density (6.25 m<sup>-2</sup>). F0: 不施肥 Non-fertilization; F1: 低施肥量 (每株 5 g) Low fertilization amount (5 g per plant); F2: 高施肥量 (每株 10 g) High fertilization amount (10 g per plant).



红线和蓝线分别表示负效应和正效应, 线上数值为路径系数 Red lines and blue lines represent negative effects and positive effects respectively, and the values on the lines are the path coefficients. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ .

图 1 种植密度和施肥量对林下草珊瑚产量和品质影响的结构方程模型  
Fig. 1 Structural equation model of effects of planting density and fertilization amount on yield and quality of understory *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai

### 3 讨 论

合理的种植密度和适宜的施肥量是促进药用植物生长发育的关键。对松果菊 [*Echinacea purpurea* (Linn.) Moench] 的研究表明: 在施加氮、钾肥的情况下, 高种植密度能提高松果菊产量, 低种植密度则有

助于增加其株高<sup>[23]</sup>。本研究中, 低种植密度 (6.25 m<sup>-2</sup>) - 高施肥量 (每株 10 g) 下的林下草珊瑚株高在 3 个处理时间均最高。但种植密度和施肥量及二者交互作用对林下草珊瑚株高的影响并不显著, 这可能是因为本研究的处理时间不够长, 草珊瑚的形态变化尚不明显。

种植密度和施肥量均会影响植物的产量<sup>[24]</sup>。本研究结果显示: 减小种植密度并增加施肥量可以提高草珊瑚的单株干质量, 但高种植密度 (25.00 m<sup>-2</sup>) 下的折合产量显著高于中种植密度 (11.11 m<sup>-2</sup>) 和低种植密度, 这与前人对水稻 (*Oryza sativa* Linn.) 的研究结果<sup>[25]</sup>一致, 即增加种植密度虽然降低了单株质量, 但提高了单位面积产量。本研究中, 草珊瑚在高种植密度 - 高施肥量下的折合产量最高, 在高种植密度 - 低施肥量 (每株 5 g) 下的折合产量次之。值得注意的是, 高种植密度 - 高施肥量下的折合产量仅较高种植密度 - 低施肥量下高 6.5%, 但前者的肥料成本却为后者的 2 倍, 且在主成分分析中, 综合得分排名前 2 的处理也为高种植密度 - 高施肥量和高种植密度 - 低施肥量。因此, 综合经济效益, 高种植密度 - 低施肥量可能是更优选择。未来的研究应进一步衡量经济效益、生态效益和社会效益, 权衡成本与收益, 为森林可持续经营提出合理规划。

次生代谢产物在植物生命活动中起着重要作用, 药用植物的次生代谢产物积累与其药用品质密不可分。种植密度和施肥量通过影响供给植物个体生长的水分和养分影响植物的次生代谢产物积累<sup>[26-27]</sup>。在较高的种植密度下, 植物对资源的竞争加剧, 从而产生抗逆反应, 促使植物合成黄酮类化合物等次生代谢产物以抵御氧化损伤<sup>[28-29]</sup>。本研究中, 在中和高种植密度下施加复合肥的林下草珊瑚中总黄酮含量均显著高于低种植密度 - 不施肥处理组, 表明施肥可促进较高种植密度下植物中黄酮类化合物的生物合成<sup>[30]</sup>。此外, 种植密度和施肥量对林下草珊瑚中异嗪皮啶和迷迭香酸含量的影响也较为相似。在高施肥量下, 林下草珊瑚的异嗪皮啶含量在高种植密度下显著高于中和和低种植密度; 迷迭香酸含量在高种植密度 - 低施肥量下最高。这与前人的研究结果<sup>[31-32]</sup>一致, 说明适当施肥能够改善植物的养分吸收和抗逆性, 进而提高异嗪皮啶和迷迭香酸含量。综上可得, 较高的种植密度配施复合肥, 可以显著提高林下草珊瑚的主要药用成分含量。然而, 由于植物生长、环境

适应和次生代谢产物合成之间存在着错综复杂的关系,在后续研究中需延长处理时间并增加代谢组学方面的实验,以进一步明晰种植密度和施肥量对草珊瑚主要药用成分含量的影响机制。

基于最小二乘法的结构方程模型可以分析多个观测变量与潜在变量的复杂关系<sup>[33]</sup>。本研究结构方程模型的结果表明:种植密度不仅直接影响林下草珊瑚的产量和品质,还通过改变根系形态间接影响其产量和品质;施肥量则是通过影响根系形态间接影响林下草珊瑚的产量和品质,同时通过改善土壤养分含量间接影响林下草珊瑚的品质。在土壤养分充足的条件下,植物之间的相互作用可能促进根系生长,发达的根系可以为植物提供更多的养分获取机会,从而促进植物产量和品质的提升<sup>[34-35]</sup>。施肥在高种植密度下有效缓解了土壤养分的限制,因此,在高种植密度条件下进行合理施肥可以保证土壤养分充足,促进林下草珊瑚的生长,提升其药用成分积累。但由于本次实验处理时间较短,部分指标的变化规律尚不明显。在未来研究中,应延长处理时间并调整施肥策略,进一步探索种植密度和施肥量对林下草珊瑚产量和品质的影响机制,从而提升其药用价值,为森林可持续经营提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 徐艳琴,刘小丽,黄小方,等.草珊瑚的研究现状与展望[J].中草药,2011,42(12):2552-2559.
- [2] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:2020年版(一部)[M].北京:中国医药科技出版社,2020:113.
- [3] 张晓元,陈雄,蔡伟贤,等.草珊瑚茶加工工艺及质量评价[J].现代食品科技,2023,39(8):199-205.
- [4] 李潘,张定堃,林俊芝,等.基于时间优势描述结合多元统计分析构建中药含片制剂处方的优选模式:以复方草珊瑚含片为例[J].中国中药杂志,2019,44(14):3035-3041.
- [5] WEI S S, CHI J, ZHOU M M, et al. Anti-inflammatory lindenane sesquiterpenoids and dimers from *Sarcandra glabra* and its upregulating AKT/Nrf2/HO-1 signaling mechanism[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 137: 367-376.
- [6] 赖春仙.不同郁闭度阔叶林下种植草珊瑚的经济效益分析[J].河南农业,2018(14):13-14.
- [7] 徐雪蕾,卢妮妮,王新杰,等.不同套种模式下草珊瑚生物量与土壤理化性质的相关性[J].东北林业大学学报,2016,44(10):61-64.
- [8] YU Y H, LIN X, GUO Y D, et al. The compound forest-medicinal plant system enhances soil carbon utilization[J]. Forests, 2023, 14(6): 1233.
- [9] LI C, WEN R, LIU D W, et al. Assessment of the potential of *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai in treating ethanol-induced gastric ulcer in rats based on metabolomics and network analysis[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 810344.
- [10] LI Q Q, ZHANG S, WANG Y Y, et al. The total biosynthesis route of rosmarinic acid in *Sarcandra glabra* based on transcriptome sequencing [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 215: 109016.
- [11] LE Q U, LANH T N. Inhibitory capacity of xanthine oxidase, and anticancer activity of compounds from *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai flower[J]. International Food Research Journal, 2024, 31(3): 637-646.
- [12] KELLER M, MILLS L J. High planting density reduces productivity and quality of mechanized Concord juice grapes [J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2021, 72(4): 358-370.
- [13] POSTMA J A, HECHT V L, HIKOSAKA K, et al. Dividing the pie: a quantitative review on plant density responses [J]. Plant, Cell and Environment, 2021, 44(4): 1072-1094.
- [14] GERAMI F, MOGHADDAM P R, GHORBAN R, et al. Influence of planting date and plant density on morphological characteristics, seed yield and essential oil percentage of oregano (*Origanum vulgare* L.) [J]. Journal of Applied Horticulture, 2018, 20(3): 171-176.
- [15] 王雁丽,郑敏娜.播种行距和灌水量对春箭筈豌豆种子产量及其构成因素的影响[J].中国农学通报,2014,30(26):6-10.
- [16] 白慧媛,张文珍,陈凤,等.不同施肥量和种植密度对紫锥菊质量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(3):24-36.
- [17] AYYAT A. Influence of plant density and fertilization treatments on growth and productivity of caraway (*Carum carvi* L.) plants [J]. Journal of Plant Production, 2022, 13(9): 711-718.
- [18] 陈斌.密度和施肥对两种药用甘草生长及药材产量与品质的影响[D].石河子:石河子大学,2021:5-6.
- [19] MOHAMMED H I, RAHMAN H B A, TAHIR H T. Effect of organic fertilizer and emitter type on the growth and yield of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) with evaluation of the drip irrigation system [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 910: 012071.
- [20] MORTEZA E, AKBARI G A, SANAVI S A M M, et al. Planting density influence on variation of the essential oil content and compositions in valerian (*Valeriana officinalis* L.) under different sowing dates [J]. African Journal of Microbiology Research, 2009, 3(12): 897-902.
- [21] 王忠伟,黄安香,杨守禄,等.草珊瑚活性成分提取及含量测定方法研究[J].贵州林业科技,2022,50(1):14-18,44.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [23] AHMADI F, SAMADI A, RAHIMI A. Improving growth properties and phytochemical compounds of *Echinacea purpurea* (L.) medicinal plant using novel nitrogen slow release fertilizer under

- greenhouse conditions[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 13842.
- [24] ZHAO Y, HUANG Y, LI S, et al. Improving the growth, lodging and yield of different density-resistance maize by optimising planting density and nitrogen fertilisation [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2020, 66(9): 453–460.
- [25] ZHOU W T, YAN L L, FU Z Q, et al. Increasing planting density and reducing N application improves yield and grain filling at two sowing dates in double-cropping rice systems[J]. *Plants*, 2023, 12(12): 2298.
- [26] ESMAEILIAN Y, AMIRI M B, NEAMATOLLAHI E. High density planting and manure affect flower yield, corn characteristics, and volatile compounds of saffron (*Crocus sativus* L.) [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 176: 114363.
- [27] MASSARIOLI A P, DE ALENCAR S M, SIQUEIRA A F, et al. Evaluation of the quality and antioxidant activity of dehydrated medicinal herbs[J]. *Horticulturae*, 2023, 9(5): 597.
- [28] JIA T T, CHEN B, MA M. Effects of planting density on the growth, taproots yield and quality of *Glycyrrhiza uralensis* [J]. *Legume Research*, 2023, 46(1): 62–68.
- [29] ONIGA I, TOIU A, HANGANU D, et al. Influence of fertilizer treatment on the chemical composition of some *Calendula officinalis* varieties cultivated in Romania [J]. *Farmacia*, 2018, 66(6): 995–998.
- [30] MOHAMMADIAN R, TAHMASEBPOUR B, SAMIMIFAR P, et al. Effect of planting date and density on calendula and peppermint herbs[J]. *Journal of Advances in Agriculture*, 2014, 1(1): 25–29.
- [31] ROUSSIS I, KAKABOUKI I, MAVROEIDIS A, et al. Seed fixed oil content, oil yield, and fatty acids profile of *Nigella sativa* L. in response to fertilization and plant density [J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2022, 50(2): 12768.
- [32] TOUNEKTI T, VADEL A M, Ennajeh M, et al. Ionic interactions and salinity affect monoterpene and phenolic diterpene composition in rosemary (*Rosmarinus officinalis*) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(3): 504–514.
- [33] GOLOB T F. Structural equation modeling for travel behavior research [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2003, 37(1): 1–25.
- [34] WANG S, LI L, ZHOU D W. Root morphological responses to population density vary with soil conditions and growth stages: the complexity of density effects[J]. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(15): 10590–10599.
- [35] KAZUMICHI F J. Plant strategy of root system architecture and exudates for acquiring soil nutrients [J]. *Ecological Research*, 2024, 39(5): 623–633.

(责任编辑: 吴蕊夷)

(上接第 51 页 Continued from page 51)

- [42] CHALLACOMBE J F, HESSE C N, BRAMER L M, et al. Genomes and secretomes of *Ascomycota* fungi reveal diverse functions in plant biomass decomposition and pathogenesis [J]. *BMC Genomics*, 2019, 20: 976.
- [43] ROSALES-CASTILLO J A, OYAMA K, VÁZQUEZ-CARCIDUEÑAS M S, et al. Fungal community and ligninolytic enzyme activities in *Quercus deserticola* Trel. litter from forest fragments with increasing levels of disturbance[J]. *Forests*, 2018, 9: 11.
- [44] SHEARER C A, DESCALS E, KOHLMAYER B, et al. Fungal biodiversity in aquatic habitats[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16: 49–67.
- [45] JONES M D M, FORN I, GADELHA C, et al. Discovery of novel intermediate forms redefines the fungal tree of life[J]. *Nature*, 2011, 474: 200–203.
- [46] BAUER R, GARNICA S, OBERWINKLER F, et al. Entorrhizomycota: a new fungal phylum reveals new perspectives on the evolution of fungi[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(7): e0128183.
- [47] POTTER T S, ANACKER B L, CHURCHILL A C, et al. Plant species' influence on rhizosphere microbial communities depends on N availability[J]. *Plant and Soil*, 2023, 491: 681–696.
- [48] FIERER N, JACKSON R B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(3): 626–631.
- [49] PHILIPPOT L, RAAIJMAKERS J M, LEMANCEAU P, et al. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, 11: 789–799.
- [50] PANKE-BUISSSE K, POOLE A C, GOODRICH J K, et al. Selection on soil microbiomes reveals reproducible impacts on plant function[J]. *The ISME Journal*, 2015, 9: 980–989.

(责任编辑: 吴蕊夷)