

## 不同基质和施肥量对桃儿七幼苗成活、植株生长及活性物质积累的影响

谢雕雕<sup>1</sup>, 苏红彦<sup>2</sup>, 赵巧竹<sup>1</sup>, 韩光雅<sup>3</sup>, 付锦平<sup>3</sup>, 韩江媛<sup>1</sup>, 董妙音<sup>1</sup>, 栗孟飞<sup>1,2,4\*</sup>

1. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070
2. 甘肃农业大学农学院 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070
3. 甘肃洮河国家级自然保护区管护中心拉力沟保护站, 甘肃 卓尼 747600
4. 国家药监局中药材及饮片质量控制协同创新中心, 甘肃 兰州 730070

**摘要:** 目的 找到适宜桃儿七 *Sinopodophyllum hexandrum* 幼苗成活和植株生长的育苗基质和种植施肥量, 为高效种植和植株生长提供技术支撑。方法 以桃儿七成熟种子和温室植株为材料, 分别利用 6 种育苗基质 (S1~S6) 和施用 4 个水平施肥量 (F1~F4), 测定幼苗成活特性、植株生长特性及主要活性物质含量。结果 不同育苗基质和施肥量对桃儿七幼苗成活和生长及主要活性物质积累具有显著影响。S2 育苗基质优于其他处理, 幼苗成活率相对于对照增加 22.90 倍。F1 和 F2 施肥量 (2 400 和 4 200 kg/hm<sup>2</sup>) 优于其他处理, 根干质量相对于对照分别增加 1.12 和 1.34 倍; F1 施肥量较有利于主要活性物质积累, 以单株计算, 根中鬼臼毒素、4'-去甲基表鬼臼毒素、异槲皮苷、槲皮素、总黄酮类和总酚类化合物含量相对于对照分别增加 1.08、1.68、1.28、1.39、1.42 和 1.47 倍。结论 适宜的育苗基质和施肥量可显著促进桃儿七幼苗成活、植株生长及主要活性物质的积累。为后续桃儿七生态种植提供科学依据和参考。

**关键词:** 桃儿七; 育苗基质; 施肥量; 幼苗成活; 植株生长; 活性物质积累; 鬼臼毒素; 4'-去甲基表鬼臼毒素; 异槲皮苷; 槲皮素

中图分类号: R286.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2024)22-7820-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2024.22.024

## Effect of different substrates and fertilization amounts on seedling survival, plant growth and bioactive metabolite accumulation in *Sinopodophyllum hexandrum*

XIE Diaodiao<sup>1</sup>, SU Hongyan<sup>2</sup>, ZHAO Qiaozhu<sup>1</sup>, HAN Guangya<sup>3</sup>, FU Jinping<sup>3</sup>, HAN Jiangyuan<sup>1</sup>, DONG Miaoyin<sup>1</sup>, LI Mengfei<sup>1,2,4</sup>

1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China
2. State Key Laboratory of Aridland Crop Science, College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China
3. Lalongou Protection Station of Management and Protection Center of Taohe National Nature Reserve, Zhuoni 747600, China
4. Collaborative Innovation Center for Quality Control of Traditional Chinese Medicine and Decoction Pieces of National Medical Products Administration, Lanzhou 730070, China

**Abstract: Objective** To find out suitable seedling substrates and planting fertilizer amounts for seedling survival and plant growth and provide technical supports for efficient planting and production of Taoerqi (*Sinopodophyllum hexandrum*). **Methods** A total of six different seedling substrates (S1 to S6) and four different fertilizer amounts (F1 to F4) were applied in the mature seeds and greenhouse plants respectively, and germination characteristics, plant growth and main bioactive metabolite contents in *S. hexandrum* were examined. **Results** There were significant effects of seedling substrates and fertilizer amounts on seed germination, plant growth and main bioactive metabolites accumulation in *S. hexandrum*. The S2 treatment was more suitable for seedling survival than other treatments, with a 22.90-fold increase compared with the control (CK). The F1 and F2 (2 400 and 4 200 kg/hm<sup>2</sup>) were more suitable for plant growth than other treatments, with a 1.12- and 1.34-fold increase of dry weight of rhizomes compared with the CK. The F1 treatment was suitable for the main bioactive metabolite accumulation, with a 1.08-, 1.68-, 1.28-, 1.39-, 1.42- and 1.47-fold increase

收稿日期: 2024-05-02

基金项目: 国家中药材产业技术体系 (CARS-21); 道地药材生态种植及质量保障项目 (202203002)

作者简介: 谢雕雕 (1990—), 男, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 研究方向为药用植物生物学。E-mail: xdd7688@163.com

\*通信作者: 栗孟飞 (1980—), 男, 河南驻马店人, 教授, 博士生导师, 主要从事药用植物资源与利用研究。E-mail: lmf@gsau.edu.cn

of podophyllotoxin, 4'-demethylepipodophyllotoxin, isoquercetin, quercetin, total flavonoids and total phenolics in roots on a per plant basis compared with the CK, respectively. **Conclusion** The seedling survival, plant growth and bioactive metabolite accumulation could be significantly improved by suitable seedling substrates and fertilizer amounts, these findings will provide scientific references for ecological planting of *S. hexandrum* in the future.

**Key words:** *Sinopodophyllum hexandrum* (Royle) T. S. Ying; seedling substrate; fertilizer amount; seedling survival; plant growth; bioactive metabolite accumulation; podophyllotoxin; 4'-demethylepipodophyllotoxin; isoquercetin; quercetin

桃儿七 *Sinopodophyllum hexandrum* (Royle) T. S. Ying 为小檗科桃儿七属多年生草本植物, 主要分布于我国甘肃、青海和西藏等海拔 2 000~4 000 m 的区域, 在土层深厚、疏松肥沃、富含有机质土壤中生长良好<sup>[1-2]</sup>。干燥成熟果实又名小叶莲, 为藏族习用药材, 含有木脂素类(如鬼臼毒素、4'-去甲基表鬼臼毒素、去氧鬼臼毒素)、黄酮类、多糖类等化学组分, 具有调经活血功效<sup>[3]</sup>。根富含木脂素类、黄酮类、酚类等化学组分, 具有显著的抗癌、抗病毒、抑菌等活性, 已广泛应用于临床<sup>[4]</sup>。独特的药理学活性, 使得桃儿七资源被过度采挖, 已面临濒危, 并被《中国植物红皮书》收录<sup>[5]</sup>。

为了保护和利用桃儿七资源, 很多学者在组培快繁、分根繁殖和种子繁殖等方面做了大量研究。例如, 建立了胚离体培养形成完整植株以及环境调控促进植株生长等体系<sup>[6]</sup>, 但无菌苗规模化应用于大田种植还未能实现。分根繁殖可以缩短种植周期, 但消耗了自身成药根产量, 限制了其规模化应用<sup>[2]</sup>。揭示了种子休眠机制, 通过生理生化和分子生物学方法打破物理休眠显著提高了种子萌发率<sup>[7-11]</sup>。未来, 利用桃儿七种子繁殖将是规模化种植的主要途径; 首先, 单果产种量多, 平均约 100 粒种子<sup>[12]</sup>; 实现了 30 d 种子萌发率达 90% 以上<sup>[8]</sup>; 构建并实现了桃儿七仿野生可持续规模化种植<sup>[13]</sup>。

到目前为止, 尽管种子萌发率提升和生态规模化种植模式等条件已具备<sup>[8,13]</sup>, 但是对于种子生长过程中育苗基质的选择, 以及大田规模化种植过程中施肥量控制等仍缺少科学的参考。因此, 本研究在生长环境可控条件下, 探究了不同育苗基质和生物肥料施肥量对桃儿七幼苗成活、植株生长及主要活性物质积累的影响, 旨在为桃儿七高效种子繁殖和规模化种植提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与仪器

### 1.1 材料

样品于 2020 年 8 月采自甘肃省甘南藏族自治州卓尼县纳浪乡仿野生种植点(海拔 2 450 m,

34°30'N, 103°41'E), 经甘肃农业大学栗孟飞教授鉴定为桃儿七 *S. hexandrum* Royle 的成熟果实, 种子从果实中剥离、流水冲洗干净、风干后置于 4 °C 冰箱备用。

### 1.2 仪器与试剂

Agilent 1260II 型高效液相色谱仪(美国安捷伦公司); 200T 型高速多功能粉碎机(永康市铂欧五金制品有限公司); TGL20M 型离心机(湖南凯达科学仪器有限公司); V1800 型紫外分光光度计(上海尤尼柯仪器有限公司); HZP-92 型恒温培养摇床(上海旻泉仪器有限公司); 对照品为鬼臼毒素(批号 P4405)、4'-去甲基表鬼臼毒素(批号 1643747)、异槲皮苷(批号 00140585)、槲皮素(批号 1592409)和山柰酚(批号 1354900)购自 Sigma-Aldrich 公司, 质量分数均大于 98%; 芦丁(批号 SR8250)、儿茶素(批号 SC8160)和没食子酸(批号 SG8040)购自北京索莱宝科技有限公司, 质量分数均大于 98%。

## 2 方法

### 2.1 种子育苗基质设计

选用 6 种不同基质, 分别为 S1(丹麦品氏原装进口苔藓泥炭土, 粒径 0~10 mm)、S2(甘肃绿能农科育苗基质, 执行标准 NY/T2118-2012)、S3(甘肃绿能农科栽培营养基质, 执行标准 NY/T2118-2012)、S4(牛粪:草炭:椰糠:珍珠岩=2:4:3:1, 自配)、S5(牛粪:草炭:椰糠:珍珠岩=5:2:2:1, 自配)、S6(寿光市绿龙育苗基质加工厂, 执行标准: NY/T2118-2012)中, 以砂壤土生土为对照(CK), 每种基质主要成分见表 1。

2021 年 3 月 26 日, 取干燥饱满的种子, 按照曹小路等<sup>[8]</sup>种子预处理方法, 首先, 种子置于流水冲洗表面黏液, 然后室温下浸泡萌发, 每隔 8 h 流水冲洗 1 次, 50 d 后(2021 年 5 月 15 日)挑选萌发较一致的种子(胚根为种子长度一半)播种于育苗盘(54 cm×28 cm×10 cm), 每盘 32 穴, 每穴 4 粒种子, 播种深度 1.5~2.0 cm。每个育苗基质重

表 1 不同育苗基质主要成分

Table 1 Main components of different seedling substances

基质类型	有机质/%	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	pH 值	可溶性盐浓度/(mS·cm <sup>-1</sup> )	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	通气孔隙度/%	持水孔隙度/%
CK	5.75	253.40	10.40	285.20	8.10	1.38	1.12	20.19	4.31	15.88
S1	71.43	85.98	19.45	32.93	5.48	0.61	0.18	84.21	26.14	59.07
S2	58.60	259.87	47.72	115.14	6.11	0.88	0.20	79.07	21.38	57.69
S3	52.73	664.67	112.63	353.57	6.51	3.53	0.44	50.01	14.47	35.54
S4	64.52	270.93	34.82	79.52	5.84	0.74	0.20	82.05	24.30	57.75
S5	59.58	385.44	64.05	199.44	7.05	3.13	0.33	67.19	19.52	47.68
S6	55.31	582.55	73.64	285.86	6.15	3.53	0.40	58.49	18.34	40.15

复 3 次。播种后置于温室大棚内（海拔 2 423 m；大棚温度 15~30 °C；大棚湿度 45%~75%）萌发生长，定期管理和浇水。

## 2.2 植株生长施肥量设计

在砂壤土生土：栽培营养基质 = 1 : 1 的基础上，复合微生物肥料组分为：有效活菌数（cfu）≥ 2 亿个/g、水分 ≤ 30%、N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O ≥ 20%、有机质含量 > 20%（主要菌种为解淀粉芽孢杆菌和胶冻样类芽孢杆菌），采用 4 种不同施肥量：F1（2 400 kg/hm<sup>2</sup>）、F2（4 200 kg/hm<sup>2</sup>）、F3（6 000 kg/hm<sup>2</sup>）、F4（7 800 kg/hm<sup>2</sup>），以不施肥为对照（CK）。每个施肥量重复 3 次。

2021 年 7 月 20 日，选取生长势较一致、根长 8~10 cm 的幼苗，按照行距 × 株距（15 cm × 5 cm）移栽至不同施肥量处理试验区的温室大棚内（海拔 2 423 m；37°01'N，103°07'E；大棚温度 15~30 °C；大棚湿度 45%~75%）生长，定期管理和浇水。

## 2.3 幼苗成活特征测定

2021 年 7 月 15 日（播种后 60 d），测定不同育苗基质处理下种子成活率（成活率 = 出苗数/播种数）（每个处理 3 盘，共 384 粒种子）、并对每个处理挑选长势一致的 20 个植株测定根长、株高，流水冲洗根表面基质、阴干后称量植株干质量。

## 2.4 植株生长特性测定

2023 年 10 月 15 日（移栽后 815 d），测定不同施肥量处理下植株根数，流水冲洗根表面土壤、阴干后称量根干质量。每个施肥量处理下采取 5 点取样法，每个样点 10 个植株。

## 2.5 木脂素类和黄酮类化合物含量测定

**2.5.1 供试品溶液制备** 取不同生物肥料处理下阴干的根，粉碎后过 0.18 mm 筛，准确称取 2.0 g 置于三角瓶，加入 50 mL 95%乙醇置于摇床 20 °C、120 r/min 振荡 72 h；然后离心机 4 °C、6 000 r/min 离心 10 min，收集上清液并用 95%乙醇定容至 50

mL，所得提取液在 4 °C 保存<sup>[14]</sup>。每个处理重复 3 次。

**2.5.2 对照品溶液的制备** 精密称取鬼臼毒素、4'-去甲基表鬼臼毒素、异槲皮苷、槲皮素、山柰酚和芦丁各 5.0 mg，色谱甲醇溶解并定容至 5 mL，分别制成 1.0 mg/mL 的单标储备液；根据实际检测需求，将每个单标精密吸取 0.4 mL 于 5 mL 量瓶中，并用色谱甲醇定容，得质量浓度为 80 μg/mL 的混标溶液，4 °C 下保存备用。

**2.5.3 色谱条件** 色谱柱为 Eclipse Plus C<sub>18</sub>（250 mm × 4.6 mm，5 μm），流动相乙腈（A）-0.1%磷酸（B），梯度洗脱（0~8 min，15%~40% A；8~12 min，40%~65% A；12~14 min，65%~85% A；14~16 min，85%~15% A；16~20 min，15% A），检测波长 280 nm，体积流量 1.0 mL/min，柱温 30 °C，进样量 5.0 μL<sup>[14]</sup>。供试品溶液和混合对照品溶液色谱图见图 1。

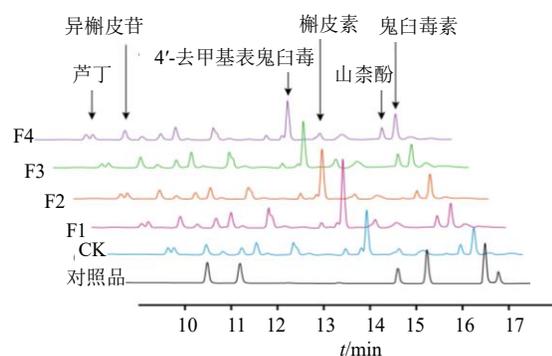


图 1 对照品和样品的 HPLC 色谱图

Fig. 1 Representative HPLC chromatography images of reference standards and samples

**2.5.4 线性关系考察** 精密吸取“2.5.2”项下混合对照品溶液适量，用色谱甲醇稀释成不同质量浓度（40、20、10、5、2.5 和 1.25 μg/mL）的对照品溶液。按照“2.5.3”项下色谱条件测定，以对照品浓度为横坐标（X），峰面积为纵坐标（Y）绘制标准曲线，得线性回归方程，结果见表 2。

表 2 线性回归方程

Table 2 Linear regression equation

化合物	回归方程	<i>r</i>	线性范围/( $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	检测限/( $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	定量限/( $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ )
鬼臼毒素	$Y=42\ 600 X-360$	0.999 7	1.25~80.00	0.23	0.72
4'-去甲基表鬼臼毒素	$Y=20\ 100 X-540$	0.999 9	1.25~80.00	0.65	0.58
异槲皮苷	$Y=4\ 900 X-530$	0.999 8	1.25~80.00	0.53	1.25
槲皮素	$Y=4\ 060 X-506$	0.999 8	1.25~80.00	0.48	1.69
山柰酚	$Y=6\ 190 X-763$	0.999 9	1.25~80.00	0.39	1.85
芦丁	$Y=6\ 580 X-308$	0.999 8	1.25~80.00	0.67	1.34

**2.5.5 精密度试验** 精密称取样品粉末，按照“2.5.1”项下方法制备，“2.5.3”项下色谱条件连续进样 6 次，计算得到鬼臼毒素、4'-去甲基表鬼臼毒素、异槲皮苷、槲皮素、山柰酚和芦丁的相对峰面积 RSD 均小于 3.6%。

**2.5.6 稳定性试验** 精密称取样品粉末，按照“2.5.1”项下方法制备，“2.5.3”项下色谱条件分别在 0、2、4、8、12、24 h 测定鬼臼毒素、4'-去甲基表鬼臼毒素、异槲皮苷、槲皮素、山柰酚和芦丁的相对峰面积，RSD 值均小于 4.7%。

**2.5.7 重复性试验** 精密称取样品粉末 6 份，按照 2.5.1 项下方法制备，“2.5.3”项下色谱条件测定，计算得到鬼臼毒素、4'-去甲基表鬼臼毒素、异槲皮苷、槲皮素、山柰酚和芦丁的质量分数 RSD 均小于 3.5%。

**2.5.8 加样回收率试验** 取本品粉末 1.0 g，精密称定，平行 6 份，分别精密加入与样品中含量相当的鬼臼毒素、4'-去甲基表鬼臼毒素、异槲皮苷、槲皮素、山柰酚和芦丁，按“2.5.1”项下方法制备供试品溶液，并计算平均加样回收率及 RSD，鬼臼毒素、4'-去甲基表鬼臼毒素、异槲皮苷、槲皮素、山柰酚和芦丁的回收率分别为 88.11%、103.90%、96.69%、113.70%、98.37%、108.6%，RSD 值分别为 3.25%、3.02%、1.91%、5.01%、1.02%、2.48%。

**2.5.9 含量的测定** 精密吸取供试品溶液 5 mL，用 0.22  $\mu\text{m}$  有机滤膜滤过至 1.5 mL 进样瓶中，按照“2.5.3”项下的色谱条件进行测定。

## 2.6 总黄酮类化合物含量测定

采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠法测定总黄酮类化合物含量<sup>[15]</sup>。测定时供试品溶液加样量为 1.0 mL，以儿茶素为对照品标定总黄酮类化合物的含量。

## 2.7 总酚类化合物含量测定

采用福林酚试剂法测定总酚类化合物含量<sup>[15]</sup>。测定时供试品溶液加样量为 50  $\mu\text{L}$ ，以没食子酸为对照品标定总酚类化合物的含量。

## 2.8 统计与分析

每个测定重复 3 次，采用 SPSS 22.0 软件进行 One-Way ANOVA Duncan 数据差异显著性分析；采用 Microsoft Office Excel 2021 进行制图。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同育苗基质对幼苗成活特征的影响

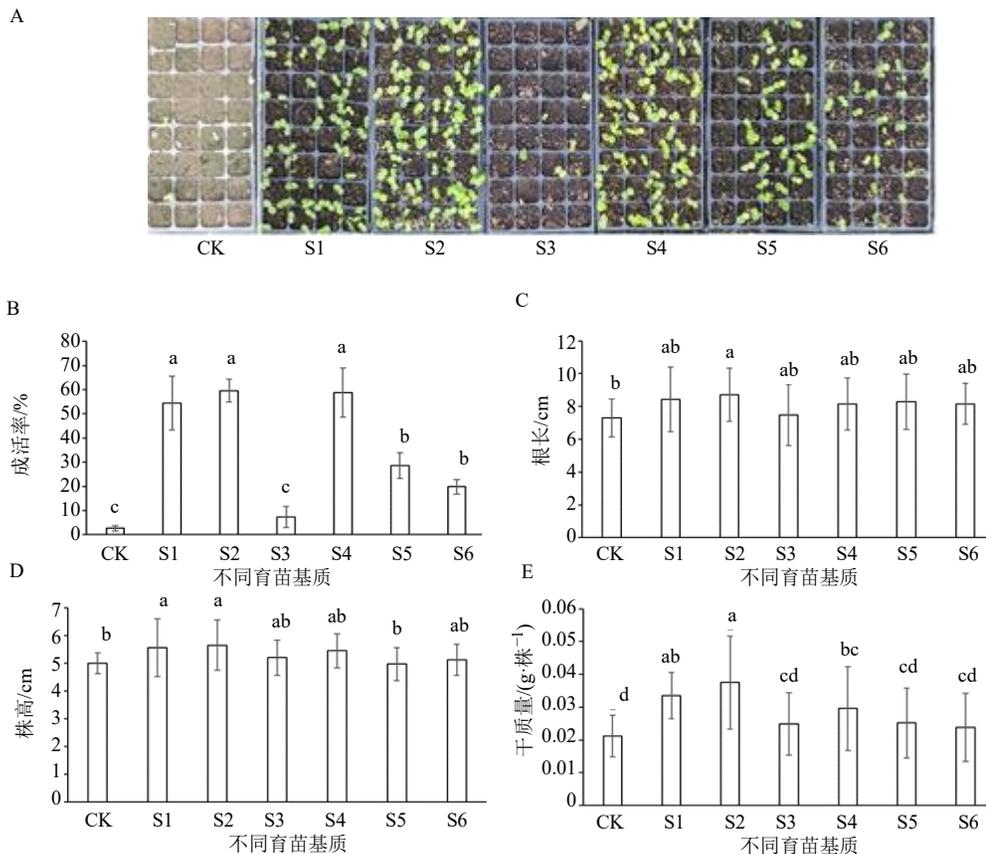
幼苗成活率在 S1、S2 和 S4 处理下显著高于其他处理，S1、S2 和 S4 之间无显著差异（图 2-A、2-B）。S2 处理根长显著高于 CK（图 2-C）；S1 和 S2 处理株高显著高于 S5 和 CK（图 2-D）；S2 处理干质量显著高于 S3~S6 和 CK（图 2-E）。以上结果表明，不同育苗基质对桃儿七种子成活具有显著影响，S1 和 S2 处理较有利于种子成活。

### 3.2 不同施肥量对植株生长的影响

图 3 结果显示，随着施肥量的增加，根数和单株干质量呈现先升高后降低的趋势。根数在 F1 和 F2 处理显著高于 F3、F4，但与 CK 之间并无显著差异，其中，F1 相对于 F3、F4 和 CK 分别增加 1.34、1.33 和 1.11 倍（图 3-A、3-B）。根干质量在 F2 处理下显著高于 F1、F3、F4 处理和 CK，分别增加 1.19、2.01、1.94 和 1.34 倍（图 3-C），而 F1 处理与 CK 之间并无显著差异。以上结果表明，不同施肥量对桃儿七植株生长具有一定影响，F1 和 F2 处理有利于植株生长和根生物量积累。

### 3.3 不同施肥量对根中木脂素类和黄酮类化合物含量的影响

随着施肥量的增加，以干质量计算，鬼臼毒素含量呈下降趋势，而 4'-去甲基表鬼臼毒素在 F1 达到最大值（图 4-A）；以单株计算，呈现先增加后降低趋势，鬼臼毒素含量在 F2 处理达到最大值 82.07 mg/株、4'-去甲基表鬼臼毒素含量在 F1 达到最大值 130.16 mg/株（图 4-C）。以干质量计算，异槲皮苷、槲皮素、山柰酚和芦丁含量呈现不同程度的影响（图 4-B）；以单株计算，呈现先增加后降低趋势，芦丁含量在 F2 达到最大值，而异槲皮苷、槲皮素和山柰



不同小写字母表示不同处理之间在  $P < 0.05$  水平下达到显著性差异，下同。  
Different lowercase indicates a significant difference at  $P < 0.05$  level among different treatments, same as below.

图 2 不同育苗基质对桃儿七种子成活的影响

Fig. 2 Effects of different seedling substrates on seed survival of *S. hexandrum*

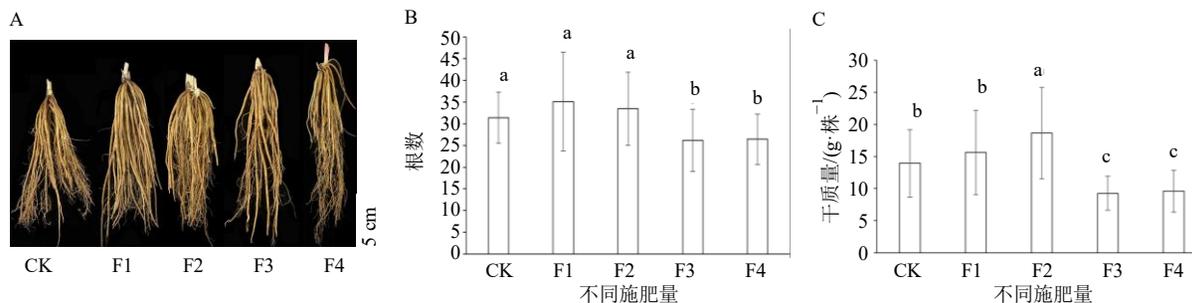


图 A、B、C 分别表示根形态、根数和根干质量。

Images A, B, and C represent root morphologies, root number, and root dry weight, respectively.

图 3 不同施肥量 (F1~F4) 对桃儿七植株生长的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization amounts (F1—F4) on plant growth of *S. hexandrum*

酚含量在 F1 达到最大值 (图 4-D)。以上结果表明，不同施肥量对桃儿七根中靶向木脂素类和黄酮类化合物含量具有显著影响，呈现 F1 和 F2 处理较有利于以上化合物的积累。

### 3.4 不同施肥量对根中总黄酮和总酚类化合物含量的影响

以干质量计算，F1 处理显著提高了根中总黄酮

和总酚类化合物含量，相对于 CK 分别提高了 1.27 和 1.31 倍，而随着施肥量增加，含量并没有显著提高 (图 5-A、5-B)。以单株计算，F1 处理显著提高了根中总黄酮和总酚类化合物含量，相对于 CK 分别提高了 1.42 和 1.47 倍，而随着施肥量增加，含量显著下降 (图 5-C、5-D)。以上结果表明，不同施肥量对桃儿七根中总黄酮和酚类化合物含量具有显

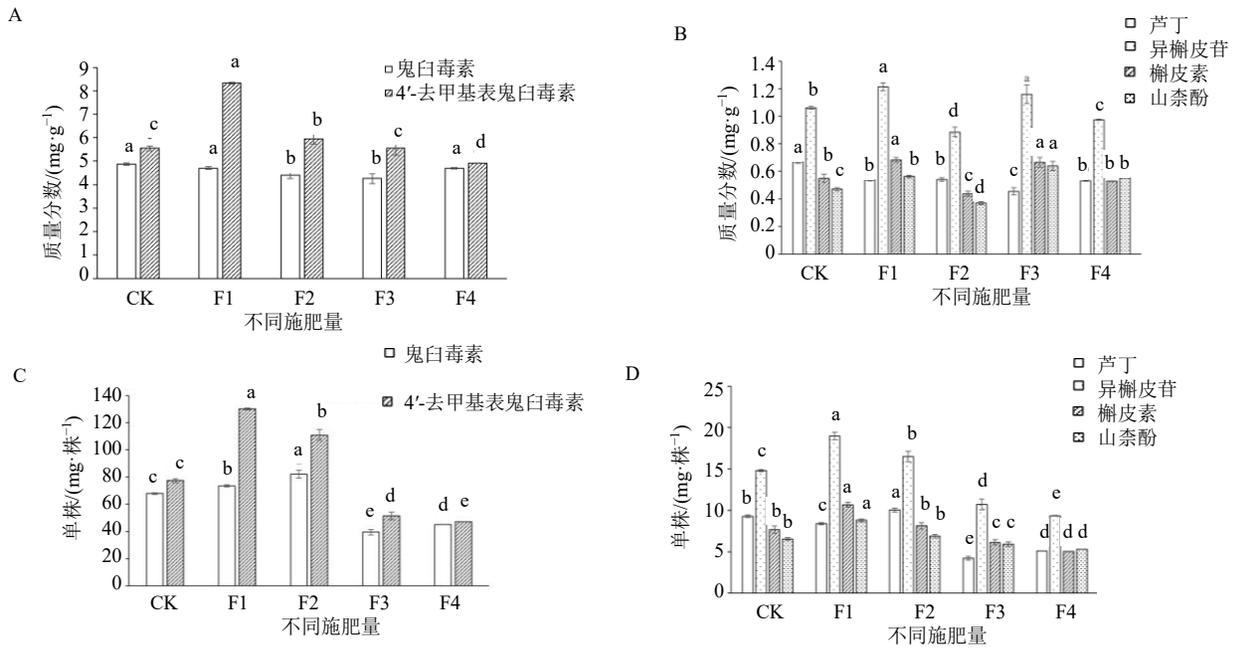


图 4 不同施肥量对桃儿七根中靶向木脂素类和黄酮类化合物含量的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization amounts on contents of target lignans and flavonoids in roots of *S. hexandrum*

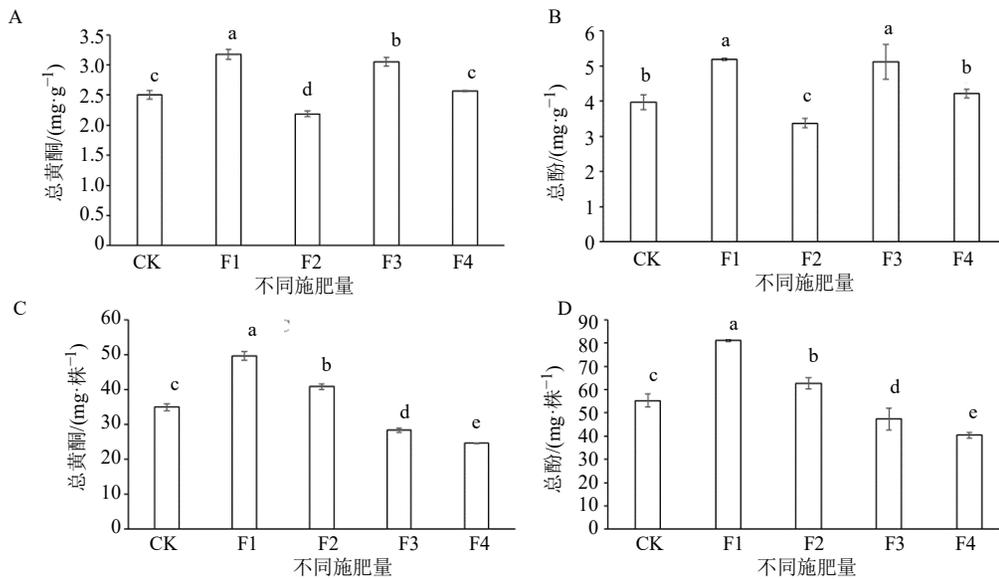


图 5 不同施肥量对桃儿七根中总黄酮和总酚类含量的影响

Fig. 5 Effects of different fertilization amounts on contents of total flavonoids and phenolics in roots of *S. hexandrum*

著影响，呈现 F1 较有利于以上化合物的积累。

#### 4 讨论

基质育苗有别于传统土壤育苗，是未来农业发展的主要趋势之一，目前已广泛应用于蔬菜、花卉和林木育苗等<sup>[16-18]</sup>。肥料是药用植物生长发育、代谢产物合成和积累不可缺少的养分，通常有限的土壤养分不能完全满足中药材生长的需求，必须通过合理施肥以提高中药材产量和品质<sup>[19]</sup>。本研究发现，不同育苗基质和施肥量对桃儿七种子成活、植

物生长及活性物质积累具有显著影响。

大量研究发现，育苗基质对植物种子萌发和生长具有显著影响。如在蛭石+珍珠岩基质中，半夏种子萌发率高达 76%，块茎单粒质量和直径显著增加<sup>[20]</sup>；在黄土基质中，苦草种子萌发率比河沙基质增加约 20%，萌发速率提高约 2 倍，且萌发时间缩短 14 d<sup>[21]</sup>；在泥炭土：珍珠岩=3：1 基质中，甜椒、卡宴线椒和巨人椒种子发芽率可达到 89%、81% 和 86%<sup>[22]</sup>。本研究发现，6 种育苗基质处理下桃儿

七种子萌发率、根长、株高和干质量均显著高于 CK (砂壤土), 其中, S2 处理效果较佳 (图 2)。根据表 1 中育苗基质主要成分来看, S2 基质中有机质、速效磷、速效钾含量和持水孔隙度较高, 且 pH 值较小, 这可能对于促进种子萌发起到重要作用。

前人对桃儿七研究发现, 土壤环境对植株生长和鬼臼毒素等化合物积累具有显著影响。比如, Alam 等<sup>[23]</sup>研究发现, 鬼臼毒素含量与有机碳 (C) 和氮 (N) 呈正相关, 与磷 (P)、钾 (K) 和 pH 值呈负相关; Li 等<sup>[24]</sup>研究发现, 鬼臼毒素含量与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、Fe 和 Mn 呈正相关, 而与  $\text{SO}_4^{2-}$  和 K<sup>+</sup> 呈负相关, 与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、Cu 和 Zn 无显著相关性; Liu 等<sup>[25]</sup>研究发现, 鬼臼毒素含量与 pH 值呈显著负相关, 而槲皮素与 pH 值呈显著正相关, 4'-去甲基鬼臼毒素与有机质呈显著负相关; 刘世巍等<sup>[26]</sup>研究发现, 施用氮 (N) 75~225 kg/hm<sup>2</sup>、磷 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 150~225 kg/hm<sup>2</sup>, 且 N :  $\text{P}_2\text{O}_5$  = 1 : 1~1 : 2, 可增加桃儿七产量。对其他药用植物研究发现, 施肥对产量和品质具有显著影响。比如, 黄芪在施用 N : P : K = 2 : 3 : 1 比例的肥料较 N : P : K = 1.25 : 3 : 1 相比, 株高、根长、地上部分鲜质量均显著提高<sup>[27]</sup>; 五味子施用适量 N 肥有利于木脂素类化合物 (如五味子醇甲、五味子醇乙和五味子酯甲等) 的积累<sup>[28]</sup>; 黄芩和黄连在适宜的施肥条件下促进植株生长和代谢产物积累, 而过量施肥起到抑制作用<sup>[29-30]</sup>。本研究发现, 随着施肥量的增加, 植株生长和主要活性物质积累呈现先增加后下降的趋势, 整体表现为 F1 (2 400 kg/hm<sup>2</sup>) 施肥量达到最大值。

综合以上结果表明, 通过合理使用育苗基质和控制施肥量, 可显著促进桃儿七种子萌发、植株生长以及根中主要活性物质积累, 但对于促进机制还需要进一步研究。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 郭彦龙, 卫海燕, 顾蔚, 等. 基于模糊物元模型的桃儿七潜在地理分布研究 [J]. 生态学报, 2015, 35(3): 770-778.
- [2] 鲍隆友, 杨小林, 刘玉军. 西藏野生桃儿七生物学特性及人工栽培技术研究 [J]. 中国林副特产, 2004(4): 1-2.
- [3] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 48.
- [4] Lv M, Xu H. Recent advances in semisynthesis, biosynthesis, biological activities, mode of action, and structure-activity relationship of podophyllotoxins: An update (2008-2010) [J]. *Mini Rev Med Chem*, 2011,

11(10): 901-909.

- [5] 李玉泽, 张东东, 姜祎, 等. 小桃儿七中 2 个新的甾体类化合物 [J]. 中草药, 2023, 54(15): 4769-4773.
- [6] 栗孟飞, 李唯. 桃儿七组织培养体系的建立及鬼臼毒素的检测 [J]. 中草药, 2010, 41(8): 1366-1370.
- [7] Cao X L, Li M L, Li J, *et al.* Co-expression of hydrolase genes improves seed germination of *Sinopodophyllum hexandrum* [J]. *Ind Crops Prod*, 2021, 164: 113414.
- [8] 曹小路, 赵巧竹, 幸华, 等. 桃儿七种子解剖结构及其萌发生长期形态特征 [J]. 植物研究, 2022, 42(5): 746-752.
- [9] Kumar V, Kumar K, Saxena P S, *et al.* Effect of plant growth regulators on germination of seed of *Podophyllum hexandrum* in high altitude region of Ladakh, India [J]. *Int J Bioassays*, 2017, 6(9): 5470.
- [10] 叶耀辉, 张文雪, 张寿文, 等. 低温沙藏对桃儿七种子破眠及其内源激素变化的影响 [J]. 时珍国医国药, 2014, 25(3): 715-717.
- [11] Dogra V, Ahuja P S, Sreenivasulu Y. Change in protein content during seed germination of a high altitude plant *Podophyllum hexandrum* Royle [J]. *J Proteomics*, 2013, 78: 26-38.
- [12] 栗孟飞, 姚园园, 丁耀录, 等. 海拔对桃儿七果实特性、活性成分含量及抗氧化能力的影响 [J]. 草业学报, 2017, 26(4): 162-168.
- [13] Li M F, Ge L, Kang T L, *et al.* High-elevation cultivation increases anti-cancer podophyllotoxin accumulation in *Podophyllum hexandrum* [J]. *Ind Crops Prod*, 2018, 121: 338-344.
- [14] Zhao Q Z, Li M L, Li M F, *et al.* Changes in growth characteristics and secondary metabolites in *Sinopodophyllum hexandrum* with increasing age [J]. *Ind Crops Prod*, 2023, 196: 116509.
- [15] 栗孟飞, 刘学周, 魏建和, 等. 基于生物量、活性物质积累和抗氧化能力的当归高海拔种植区域选择 [J]. 中草药, 2020, 51(2): 474-481.
- [16] 张苗, 陈伟, 徐丽萍, 等. 基质栽培与土壤栽培对奶白菜生长及栽培介质中微生物区系的影响 [J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1265-1273.
- [17] 任杰, 崔世茂, 刘杰才, 等. 不同基质配比对黄瓜穴盘育苗质量的影响 [J]. 华北农学报, 2013, 28(2): 128-132.
- [18] 张衡锋, 韦庆翠, 汤庚国, 等. 不同基质配比对黑果腺肋花楸容器苗生长及叶片生理特性的影响 [J]. 北方园艺, 2017(20): 104-109.
- [19] 张永清, 刘合刚. 药用植物栽培学 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2013: 23.
- [20] 李云飞. 半夏不同繁殖材料的块茎膨大规律及无土栽

- 培研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [21] 韩翠敏, 胡庚, 武涛, 等. 不同水体条件和基质类型对苦草 (*Vallisneria spiralis* L.) 种子萌发的影响 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1515-1519.
- [22] 张晓霞, 龚记熠, 乙引, 等. 不同漂浮育苗基质对辣椒种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 广东农业科学, 2015, 42(2): 27-31.
- [23] Alam M A, Naik P K. Impact of soil nutrients and environmental factors on podophyllotoxin content among 28 *Podophyllum Hexandrum* populations of northwestern Himalayan region using linear and nonlinear approaches [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2009, 40(15/16): 2485-2504.
- [24] Li M F, Li W, Yang D L, *et al.* Relationship between podophyllotoxin accumulation and soil nutrients and the influence of  $Fe^{2+}$  and  $Mn^{2+}$  on podophyllotoxin biosynthesis in *Podophyllum hexandrum* tissue culture [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2013, 71: 96-102.
- [25] Liu W, Liu J J, Yin D X, *et al.* Influence of ecological factors on the production of active substances in the anti-cancer plant *Sinopodophyllum hexandrum* (Royle) T.S. Ying [J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0122981.
- [26] 刘世巍, 丁建海, 张守宗. 不同氮与磷配比施用对桃儿七产量的影响 [J]. 湖北农业科学, 2012, 51(18): 4076-4078.
- [27] 邱黛玉, 彭宁刚, 陈小娜. 不同施肥量对黄芪生长发育、药材产量及种子产量和质量影响的研究 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(10): 95-101.
- [28] 宋新, 丁璞, 李先宽, 等. 大量元素氮胁迫对五味子木脂素类成分含量的影响 [J]. 北方园艺, 2014(6): 155-158.
- [29] 王婧, 盛晋华, 张雄杰, 等. 不同种植密度下施肥量对黄芩根系生长的影响 [J]. 北方农业学报, 2019, 47(3): 41-45.
- [30] 武华卫, 陈善波, 金银春, 等. 不同施肥量对黄连早期生长量的影响 [J]. 四川林业科技, 2017, 38(4): 1-5.

[责任编辑 时圣明]