



不同栽培基质下青钱柳实生苗生长和生理响应特征分析

冯莹, 潘洪运, 陈永山, 徐荣娟, 颜修斯, 许敬华

引用本文:

冯莹, 潘洪运, 陈永山, 等. 不同栽培基质下青钱柳实生苗生长和生理响应特征分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(5): 577–586.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4925>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

龙珠果茎段离体培养和组培苗耐盐性分析

Stem Culture *in vitro* of *Passiflora foetida* and Salt Tolerance of Seedlings

热带亚热带植物学报. 2021, 29(4): 360–366 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4323>

氮素形态对铁线莲光合特性及氮代谢的影响

Effect of Nitrogen Forms on Photosynthetic Characteristics and Nitrogen Metabolism of *Clematis*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 276–284 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4281>

锐药竹种子苗光合生理生态特性分析

Research on Photosynthetic Eco-physiological Characteristics of *Oxytenanthera abyssinica* Seedlings

热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 233–240 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3694>

岩溶与非岩溶区典型植物最适光合模型和光合特征研究

Studies on Optimal Photosynthetic Biochemical Model and Photosynthetic Characteristics of Typical Plants in Karst and Non-karst Regions

热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 187–194 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4269>

盐胁迫对竹柳幼苗生理响应及结构解剖的研究

Effect of NaCl Stress on Physiological Responses and Anatomical Structure of *Salix* spp. Seedlings

热带亚热带植物学报. 2017, 25(5): 489–496 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3741>

向下翻页，浏览PDF全文

不同栽培基质下青钱柳实生苗生长和生理响应特征分析

冯莹^{a,b}, 潘洪运^a, 陈永山^{a,b*}, 徐荣娟^a, 颜修斯^a, 许敬华^{a,b}

(泉州师范学院, a. 资源与环境科学学院; b. 环境科学研究所, 福建 泉州 362000)

摘要: 为筛选青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)高质量实生苗培育的适宜栽培基质, 采用容器育苗, 测定 4 种栽培基质(J1、J2、J3 和 J4)对实生苗成活率、生长指标和生理指标的影响。结果表明, J1 培育的实生苗成活率为 100%, 是 J2 培育的 2.25 倍; 且在株高、叶面积、地径等生长指标均优于其他 3 种基质。J2 培育的苗内含水量达到 67.25%, 可溶性糖含量仅为 2.33%, 且苗内 Ca 含量最高, 而 Na 含量最低。J4 培育的叶内 K 和 Mg 含量最高; J1 培育的叶内 4 种矿质元素的转运系数显著低于其他 3 种基质的。与 J2 相比, J1 培育的苗叶内 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量分别降低了 92.36%、80.98%、87.21%和 81.51%; PPO 活性是 J2 的 13.30 倍。通过隶属函数和主成分分析, 函数值大小依次为 J1>J4>J3>J2, 且 J1 对实生苗培育的贡献率为 89.71%; Mantel's 分析表明实生苗成活率、生长指标与含水量、SOD 活性具有显著相关性。因此, 按 10:1 体积比混合泥炭土和珍珠岩的基质是青钱柳实生苗适宜的栽培基质, 培育的实生苗成活率高, 且植株生长健壮。

关键词: 青钱柳; 实生苗; 形态; 抗氧化酶; 矿质元素

doi: 10.11926/jtsb.4925

CSTR:32235.14.jtsb.49254

Analysis of Growth and Physiological Response Characteristics of *Cyclocarya paliurus* Seedlings Under Different Cultivation Substrates

FENG Ying^{a,b}, PAN Hongyun^a, CHEN Yongshan^{a,b*}, XU Rongjuan^a, YAN Xiusi^a, XU Jinghua^{a,b}

(a. School of Resources and Environmental Science; b. Institute of Environmental Sciences, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, Fujian, China)

Abstract: To screen the suitable cultivation substrate for the high-quality seedling production of *Cyclocarya paliurus*, container seedling cultivation was adopted to determine the effects of four cultivation substrates (J1, J2, J3 and J4) on the survival rate, growth indicators and physiological indicators of seedlings. The results showed that the survival of seedlings cultivated in J1 was 100%, which was 2.25 times that of J2. Moreover, the seedlings cultivated in J1 had better growth indicators, such as plant height, leaf area and ground diameter than those in the other three substrates. The water content of seedlings cultivated in J2 reached 67.25%, and the content of soluble sugar was only 2.33%. The content of Ca in the seedlings was the highest, while the content of Na was the lowest. The content of K and Mg in the leaf of seedlings cultivated in J4 was the highest. The translocate factor of four mineral elements in the leaves cultivated in J1 was significantly lower than that in the other three substrates. Compared with J2, the activities of SOD, POD and CAT and the content of MDA in the leaves of seedlings cultivated in J1 decreased by 92.36%, 80.98%, 87.21% and 81.51%, respectively, while the activity of PPO was 13.30 times that of J2. Through the membership function and principal component analysis, the function values

收稿日期: 2024-05-07 接受日期: 2024-09-13

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2022J011107); 泉州市科技计划项目(2021C043R, 2024NN010); 大学生创新创业项目(S202210399049)资助
This work was supported by the Project for Natural Science in Fujian (Grant No. 2022J011107); the Project for Science and Technology in Quanzhou (Grant No. 2021C043R, 2024NN010), and the Project for College Student Entrepreneurship and Innovation (Grant No. S202210399049).

作者简介: 冯莹(1984 年生), 女, 博士, 硕士生导师, 主要从事园林植物资源与生物技术研究。E-mail: fengy0919@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yschen@qztc.edu.cn

were in the order of J1>J4>J3>J2, and the contribution rate of J1 to the seedling cultivation was 89.71%. Mantel's analysis showed that the survival and growth indicators of seedlings were significantly correlated with water content and SOD activity. Therefore, the substrate mixed with peat soil and perlite at a volume ratio of 10:1 is a suitable cultivation substrate for *C. paliurus* seedlings, which has a high survival rate and vigorous plant growth.

Key words: *Cyclocarya paliurus*; Seedlings; Morphology; Antioxidant enzyme; Mineral element

栽培基质是植物苗木基质栽培过程中为苗木健壮生长提供养分的场所,亦是培育抗逆性强的优质苗木的重要决定因素之一^[1-3]。不同植物对栽培基质的需求不同,培育闽楠(*Phoebe bournei*)的适宜栽培基质为 40%泥炭+40%黄泥+20%稻壳,而培育浙江楠(*P. chekiangensis*)的适宜栽培基质为 80%泥炭+10%黄泥+10%稻壳^[4];松树皮和泥炭土(体积比为 2:1)是培育石斛兰(*Dendrobium officinale*)的适宜栽培基质^[5]。此外,不同的栽培基质不仅影响着植株成活率,还对其外部形态的生长和发育、体内生理活动产生影响^[1-2,6-7]。吴俊宏等^[1]指出采用 2:1:1 体积比混合泥炭、蛭石、珍珠岩所得的栽培基质有利于桔梗(*Platycodon grandiflorus*)幼苗的生长,且幼苗体内可溶性蛋白、可溶性糖、叶绿素含量均较高;而 100%营养土抑制桔梗幼苗的生长。玉峙强等^[2]研究表明,按照 12:2:2:4 配比混合泥炭、珍珠岩、木材锯末粉、壤土,培育的降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)幼苗在生长、生理代谢活性(叶绿素含量、光合作用参数)等方面均表现为最好,且显著优于 100%壤土培育。因此,基质栽培过程中,在考虑栽培基质原料经济便宜且易于获得的基础上,还需要考虑其是否有利于植株成活和对苗木生理活动的影响。

青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)隶属于胡桃科(Juglandaceae)青钱柳属,被誉为“植物界的大熊猫”,是我国独有的单种属乔木植物,主要分布在江西、浙江、湖南、福建、四川等省的深山区^[8]。青钱柳叶内富含类黄酮、多糖等多种生物活性物质,具有降血糖、降血脂、改善免疫力、增强抗氧化能力等药用功效^[9-10],被誉为“医学第三棵树”;2013 年被国家卫计委(原国家卫计委)确定为新型药食同源原料,民间将其制成茶已有百年历史,素有“甜茶”之美誉。此外,青钱柳因其树形优美、果似铜钱,而被应用于城市公园等景观绿地。总之,青钱柳是一种集药用、食用、材用、观赏等于一体的多用途珍贵树种。

随着青钱柳药用、食用等价值的发掘和利用,

青钱柳叶需求量日益增加,这极大地促进其应用推广和栽培。截止到 2020 年 1 月,据青钱柳国家创新联盟不完全统计,全国青钱柳栽培面积达到 233.33 hm²,其中叶用栽培面积达到 133.33 hm²。目前,实生苗是青钱柳栽培的主要苗木来源,其培育质量的好坏直接影响着青钱柳栽培效率。现已从光照强度^[11]、光质^[12]、基质^[13]等培育条件集中开展 1~2 a 生青钱柳幼苗体内活性成分的研究,而关于青钱柳实生苗培育的研究较少,Tian 等^[14]指出栽培基质影响青钱柳实生苗根系生长,Feng 等^[15-16]指出栽培基质持水量、遮阴度均影响青钱柳实生苗形态发育和叶内生理指标变化。但相关研究中均未体现如何筛选适宜于青钱柳实生苗培育的栽培基质。

因此,本文以青钱柳实生苗为研究对象,研究不同栽培基质对其成活率、生长指标和生理指标变化的影响,为青钱柳实生苗培育提供技术参考。同时,筛选适宜的栽培基质对培育优质苗源也具有十分重要的意义。

1 材料和方法

1.1 试验材料 and 设计

试验材料为青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)实生苗。参考 Fang 等^[8]的方法对青钱柳种子进行萌发处理后,播种于沙床上,待种子萌发后,选择长势一致且苗高为 0.5 cm 的实生苗移植到容器袋内(规格为高度 14.5 cm、口径 10.8 cm),浇定根水后置于塑料大棚内。容器袋内盛有 4 种栽培基质,分别为基质 1、2、3、4,其中,基质 1 为按照 10:1 的体积比混合泥炭土和珍珠岩而成,记为 J1;基质 2 为按照 5:2:1:2 体积比混合黄壤土、草木灰、农家肥、珍珠岩制成,记为 J2;基质 3 为黄壤土,取自茶园地,记为 J3;基质 4 为按照 10:1 的体积比混合泥炭土和黄壤土而成,记为 J4。塑料大棚保持四周通风,并在距离地面 1.8 m 处设置 2 层遮阳网,其光照强度为 10%~20% 全光照。栽培基质持水量保持在 50%~60%,且每天

早上 6:00 补充缺失的水分。采用单因素完全随机区组设计, 每个容器袋内种植 1 株实生苗, 每个区组 15 个容器袋, 共设 3 个区组。

1.2 方法

实生苗成活测定 培育 120 d 后, 观察并统计青钱柳实生苗的成活株数。

形态指标测定 采用直尺或游标卡尺(精确到小数点后 2 位), 测定实生苗株高和地径; 采用手持式叶面积测量仪测定叶面积。

生理指标测定 培育 120 d 后, 每个区组随机选取 3 株实生苗, 将其置于流水下冲洗栽培基质, 再用滤纸擦干水分后, 将其分割为根、茎、叶 3 个部分, 用于含水量和矿质元素测定; 另外再随机选取 3 株实生苗, 自顶部向下取同一方位的第 4 片复叶, 置于液氮中处理后, 保存在-40 ℃低温冰箱内, 用于可溶性糖、抗氧化酶、丙二醛等生理指标含量测定。采用烘干法^[17]测定含水量, 根据公式 $WC=(FW-DW)/FW\times 100\%$ 分别计算实生苗根、茎、叶的含水量, 式中, WC、FW 和 DW 分别为含水率、鲜重和干重。

矿质元素提取和测定 采用电热消解法^[15], 结合电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, optima 7000DV, American)分别测定实生苗根、茎、叶内钾、钙、钠、镁 4 种元素浓度; 根据公式 $M(\mu g/g)=(C\times V)/DW$ 计算元素含量, 式中, V 为提取液体积; DW 为样品的干重; C 为测定的元素浓度。

可溶性糖提取和测定 采用硫酸-蒽酮法^[18], 用紫外分光光度法测定叶片在 630 nm 处的吸光度, 根据公式 $C(\%)=(m\times V_1)/(W\times V_2\times 1000000)\times 100\%$ 计算叶的可溶性糖含量, 式中, m 为根据标准曲线计算的糖量; V_1 为提取液体积; V_2 为测定液体积; W 为样品的鲜重。

抗氧化酶提取和测定 参考 Feng 等^[15]的方

法提取抗氧化酶液。采用氮蓝四唑法测定并计算超氧化物歧化酶(SOD)活性; 采用愈创木酚法测定并计算过氧化物酶(POD)活性; 采用邻苯二酚法测定并计算多酚氧化酶(PPO)活性; 采用比色法计算过氧化氢酶(CAT)活性。

丙二醛(MDA)提取和测定 参考李合生^[18]的方法, 采用硫代巴比妥酸法计算丙二醛含量。

1.3 数据的统计和分析

采用 One-Way analysis of variance (ANOVA)分析方法, 结合 Tukey's 显著性检验方法, 通过 SPSS 软件(18 v16.0)分析不同栽培基质在 $P\leq 0.05$ 水平上各指标的差异性影响。采用隶属函数结合主成分分析方法, 综合评价 4 种栽培基质对青钱柳实生苗培育的效果。采用 Mantel's 检验法, 分析植株成活率、生长指标与生理指标间的相关性。

2 结果和分析

2.1 不同栽培基质对实生苗成活和形态的影响

由图 1 和表 1 可见, 泥炭土和珍珠岩混合基质(J1)培育的实生苗成活率达到 100%; 且实生苗在株高、叶面积、地径 3 个方面的生长效果好, 主要表现为植株长势一致、茎干粗壮、叶片墨绿、叶肥厚、叶面积大、根系发达; 株高生长率达到 0.33 cm/d; 与其他栽培基质培育的效果呈显著差异。

2.2 不同栽培基质对含水率的影响

由图 2 可见, 4 种栽培基质培育的实生苗叶含水率较高, 其次是根, 最后是茎; 且叶含水率与根或茎含水率达显著差异。相同器官的含水率因栽培基质不同而不同, J2 培育的实生苗根、茎、叶含水率均高于其他基质, 且 J2 的根含水率是 J3 的 1.22 倍, 茎含水率是 J1 的 1.28 倍, 叶含水率是 J4 的 1.16 倍, 均达显著差异。

表 1 不同栽培基质对青钱柳实生苗生长的影响

Table 1 Effects of different cultivation substrates on seedling growth in *Cyclocarya paliurus*

栽培基质 Cultivation substrate	成活率 /% Survival rate	株高生长率 Growth rate of height (cm/d)	叶面积 Leaf area (cm ²)	地径 Basal diameter (mm)	干重:鲜重 DW:FW	根冠比 Ratio of root to stem and leaf
J1	100.00±0a	0.33±0.03a	38.99±2.02a	5.29±0.76a	0.42±0.02a	0.41±0.03bc
J2	44.44±3.85c	0.16±0.0c	13.72±1.83b	2.06±0.46c	0.31±0.04b	0.31±0.04c
J3	71.11±3.85b	0.16±0.0c	17.72±1.90b	2.41±0.38c	0.43±0.02a	0.57±0.06a
J4	100.00±0a	0.24±0.03b	15.58±3.25b	3.80±0.43b	0.39±0.04a	0.51±0.07ab

同列数据后不同字母表示差异显著($P\leq 0.05$)。下同

Data followed different letters indicate significance differences at 0.05 level. The same below



图 1 不同栽培基质下青钱柳实生苗的生长。A: 实生苗; B~E 分别为 J1、J2、J3 和 J4 培育的实生苗根系。

Fig. 1 Seedling growth of *Cyclocarya paliurus* under different cultivation substrates. A: Seedlings; B~E show roots under J1, J2, J3 and J4 substrate, respectively.

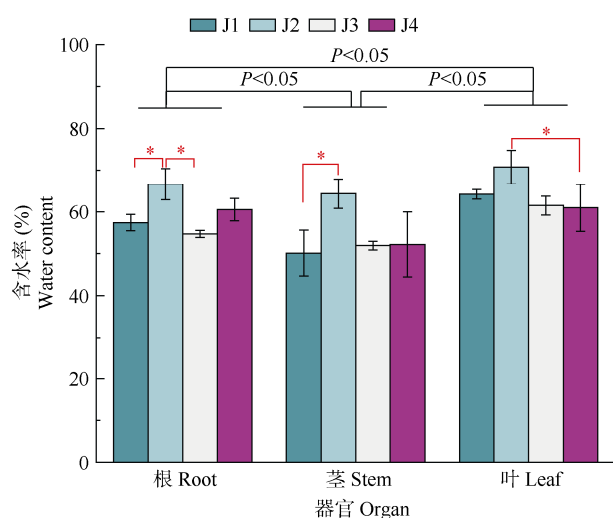


图 2 不同栽培基质对青钱柳实生苗含水率的影响。*: $P \leq 0.05$ 。下同

Fig. 2 Effect of cultivation substrates on water content in *Cyclocarya paliurus* seedlings. *: $P \leq 0.05$. The same below

2.3 不同栽培基质对矿质元素含量的影响

由图 3 可见, 4 种栽培基质培育的实生苗 Ca 含量较高(5.76~18.80 mg/g), 其次是 K 和 Mg, 最后是 Na。根、茎、叶各矿质元素含量因栽培基质不同而呈现差异性, 其中, J4 培育的根 K 含量显著高于 J3; J2 培育的茎 K 含量是 J3 的 1.67 倍; J4 培育的叶 K 含量是 J1 的 6.55 倍。

J1 培育的根 Ca 含量显著高于其他 3 种栽培基质, J2、J3、J4 培育的根 Ca 含量比 J1 分别降低了 53.67%、80.25%和 54.28%。J1 和 J2 培育的茎 Ca

含量未呈现显著性差异, 但与 J3、J4 培育的茎 Ca 含量达显著差异。J1、J2、J4 培育的叶 Ca 含量较高(≥ 15.00 mg/g), 且与 J3 达显著差异。

J1、J2、J4 培育的根 Mg 含量较高(≥ 1.40 mg/g), 与 J3 达显著差异。J2 培育的茎 Mg 含量较高, 其次是 J1、J4, 最后是 J3。J4 培育的叶 Mg 含量最高, J2、J3、J4 分别降低了 50.79%、61.60%和 79.48%。

J1 培育的根 Na 含量显著高于其他 3 种栽培基质, 分别是 J2、J3、J4 的 1.62、1.48、1.79 倍。J3 培育的茎 Na 含量与其他 3 个栽培基质达显著差异。J3、J4 培育的叶 Na 含量较高(≥ 1.00 mg/g), 但 J1、J2 仅与 J4 达显著差异。

2.4 不同栽培基质对矿质元素转运系数的影响

由图 4 可见, 4 种栽培基质培育的实生苗体内, Ca 转运系数较高(2.39~4.77), 其次是 K 和 Mg, 最后是 Na。各矿质元素转运系数因栽培基质不同而呈现差异性, 其中, J2、J3 培育的实生苗体内 Ca 转运系数分别是 J1 的 1.98、1.99 倍, 且达到显著差异; 而 J4 与其他 3 种基质的差异不显著。

J4 培育的实生苗体内 K 转运系数达到峰值, 其次是 J2 和 J3, 最后是 J1。与 J4 相比, J1、J2、J3 培育的实生苗体内 K 转运系数分别降低了 59.27%、38.24%、30.79%。与 J3 相比, J1、J2 分别降低了 41.15%、10.76%。

J3 培育的实生苗体内 Mg 转运系数达到峰值, 其次是 J2 和 J4, 最后是 J1。与 J1 相比, J2、J3 培

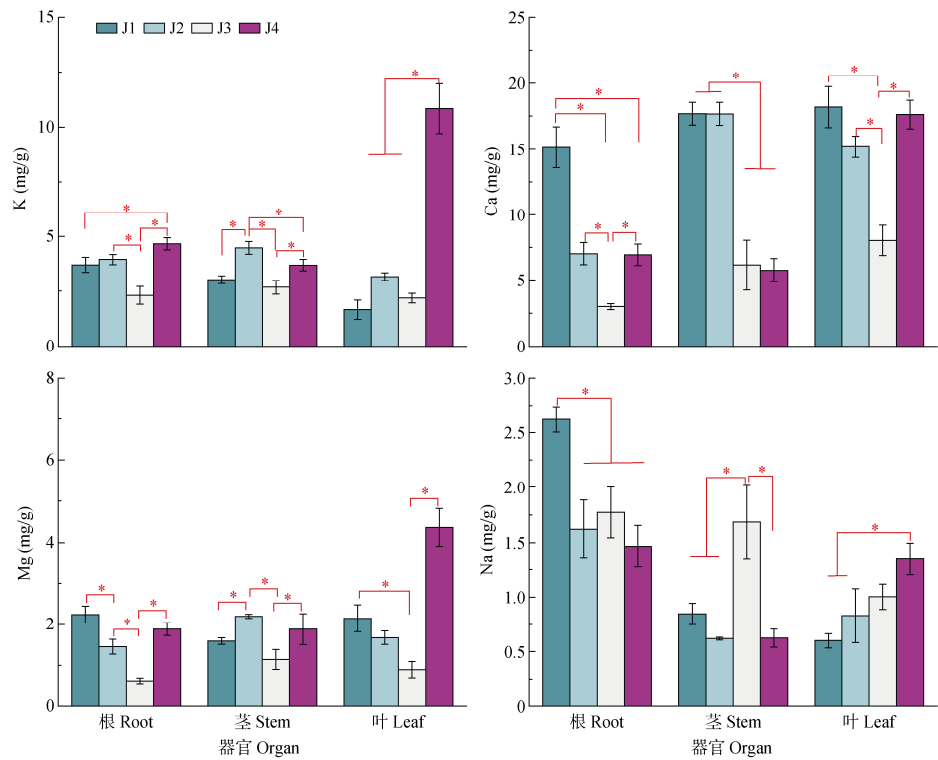


图 3 青钱柳实生苗矿质元素含量的变化

Fig. 3 Changes in mineral contents of *Cyclocarya paliurus* seedlings

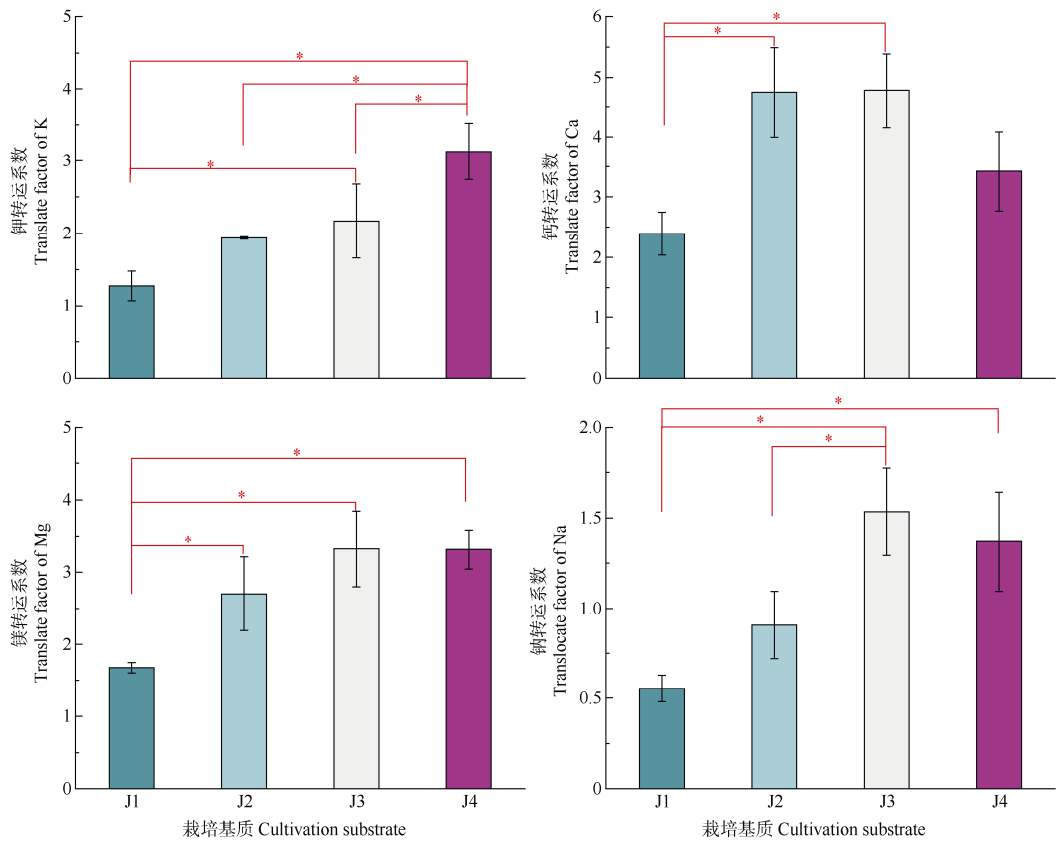


图 4 青钱柳实生苗矿质元素的转运系数

Fig. 4 Translocate factor of mineral elements in *Cyclocarya paliurus* seedlings

育的实生苗体内 Mg 转运系数分别升高了 61.46%、98.50%。但 J2、J3、J4 之间未达到差异性。

J3、J4 培育的实生苗体内 Na 转运系数较高 (≥ 1.30), 而 J1、J2 均低于 1.0。与 J1 相比, J2、J3、J4 分别升高了 68.92%、176.98%和 147.11%。

2.5 不同栽培基质对可溶性糖含量的影响

由表 2 可见, J1、J3 培育的实生苗叶内可溶性糖含量较高 ($\geq 3.5\%$), 与 J2、J4 均达显著差异。

表 2 不同栽培基质对青钱柳实生苗叶片生理指标的影响

Table 2 Effects of different cultivation substrates on physiological characteristic in leaves of seedlings in *Cyclocarya paliurus*

栽培基质 Cultivation substrate	TSS (%)	SOD (U/g FW)	PPO [U/(g·min)]	POD [U/(g·min)]	CAT [U/(g·min)]	MDA ($\mu\text{mol/g}$)
J1	3.66±0.21a	39.08±15.73b	28.39±1.09a	1.93±0.09b	0.63±0.10b	13.72±4.12c
J2	2.33±0.43b	512.09±138.96a	2.13±0.23b	10.17±0.58a	4.91±1.08a	74.24±6.99a
J3	3.61±0.09a	420.81±59.33a	2.22±0.33b	11.03±1.50a	6.02±2.08a	56.08±8.23b
J4	2.43±0.27b	207.50±27.39b	0.69±0.20b	2.21±0.54b	3.42±1.03ab	28.59±4.06c

J1 培育的实生苗 PPO 活性较高 [≥ 25.0 U/(g·min)], 且与 J2、J3、J4 达显著差异。与 J1 相比, J2、J3、J4 分别降低了 92.48%、92.18%、97.54%, J2、J3、J4 间未达显著差异。

J2、J3 培育的实生苗的 POD 活性较高, 均 ≥ 10.0 U/(g·min), 而 J1、J4 较低 [≤ 2.50 U/(g·min)]; 且 J2、J3 与 J1、J4 间达显著差异。

J3 培育的实生苗 CAT 活性较高 [≥ 5.0 U/(g·min)], 其次是 J2 和 J4 [3.0~5.0 U/(g·min)], 最后是 J1 [≤ 1.0 U/(g·min)]。与 J3 相比, J1、J2、J4 分别降低了 89.57%、18.44%、43.17%。

2.7 不同栽培基质对丙二醛含量的影响

由表 2 可见, J2、J3 培育的实生苗体内 MDA 含量较高 (≥ 55.0 $\mu\text{mol/g}$), 其次是 J4, 最低的是 J1 (≤ 15.0 $\mu\text{mol/g}$)。J2、J3 分别是 J1 的 5.41、4.09 倍, 并达显著差异, 但 J2、J3 间未达显著差异。

2.8 不同栽培基质的指标隶属函数和相关性分析

对 4 种栽培基质下实生苗成活率、生长指标 (5 个)、生理指标 (11 个) 进行隶属函数值排序和主成分分析 (表 3), 结果表明 4 种栽培基质的综合隶属函数值的大小依次为 J1>J3>J4>J2; 4 种栽培基质中 J1 对生长效应的贡献率最高, 达到 89.71% (图 5: A)。对 4 种栽培基质下实生苗成活率、生长指标 (5 个)、生理指标 (11 个) 进行 Mantel's 检验, 结果表明实生苗成活率、生长指标与生理指标之间具有相关性 (图 5: B), 如: 成活率与实生苗体内含水

2.6 不同栽培基质对抗氧化酶活性的影响

由表 2 可见, 4 种栽培基质培育的实生苗体内 SOD 活性较高, 其次是 PPO 和 POD, 最后是 CAT。各抗氧化酶活性因栽培基质不同而呈现差异性, 其中, J1 培育的实生苗 SOD 活性较低 (≤ 50.0 U/g FW), 且与 J2、J3、J4 达显著差异。而 J2 较高 (≥ 500.0 U/g FW), 分别是 J1、J3、J4 的 13.10、1.22、2.47 倍。

量达到显著相关性; 植株株高与其体内 Ca 含量、酶活性、MDA 含量具有显著相关性。此外, 各生理指标间亦表现出正相关或负相关, MDA 含量与 SOD、POD、CAT 活性呈极显著正相关; Na 含量与 K、Ca、Mg 含量均呈负相关性。

3 讨论和结论

适宜的栽培基质有利于植株成活, 并保证苗木茁壮生长。不同的栽培基质对植株成活率、生长指标表现出不同的效应^[1-7]。泥炭土是基质栽培的常用基质类型之一, 众多研究均表明泥炭土或泥炭土与其他基质按一定比例混合而成的基质是适宜的栽培基质^[1-7]。与其相似, 本研究中泥炭土和珍珠岩混合而成的栽培基质 J1 培育的实生苗成活率达到 100%, 且植株在株高、叶面积、根冠比等方面均表现出较好的生长势。通过隶属函数分析和主成分分析进一步说明, J1 是适宜青钱柳实生苗培育的栽培基质。这可能是由于泥炭土含有丰富的营养物质, 且拥有较好的保水性^[19], 有助于提高成活率; 同时, 珍珠岩增加基质的透气性, 有利于微生物的定殖, 加快有机质的分解, 从而促进植物对养分的吸收和转运^[1,20]。但是, J2、J3 不利于实生苗培育, 这可能是因为 J2 内草木灰、农家肥富含较高的营养物质易造成烧根, 从而不利于根系生长; J3 中黄壤土粘度高、透气性差, 不利于地上部分的茁壮生长。这与

表 3 不同栽培基质的指标隶属函数值和综合评价

Table 3 Function values of subordination and synthetical evaluation of different cultivation substrates

指标 Index	栽培基质 Cultivation substrate			
	J1	J2	J3	J4
成活率 Survival rate (SR)	1	0	0.48	1
株高增长率 Growth rate of height	1	0.04	0	0.50
叶面积 Leaf area	1	0	0.16	0.07
地径 Basal diameter	1	0	0.11	0.54
干重/鲜重 DW/FW (DF)	0.89	0	1	0.68
根冠比 Ratio of root to stems and leaves (RSR)	0.39	0	1	0.75
含水量 Water content (WC)	0.11	1	0	0.32
可溶性糖 Total soluble sugar (TSS)	1	0	0.97	0.08
K	0.10	0.37	0	1
Ca	1	0.67	0	0.39
Mg	0.61	0.49	0	1
Na	0.72	0	1	0.27
CAT	0	0.80	1	0.52
PPO	1	0.05	0.05	0
POD	0	0.91	1	0.03
SOD	0	1	0.81	0.36
MDA	0	1	0.70	0.25
隶属函数值 Subordinate function value	0.58	0.37	0.49	0.46

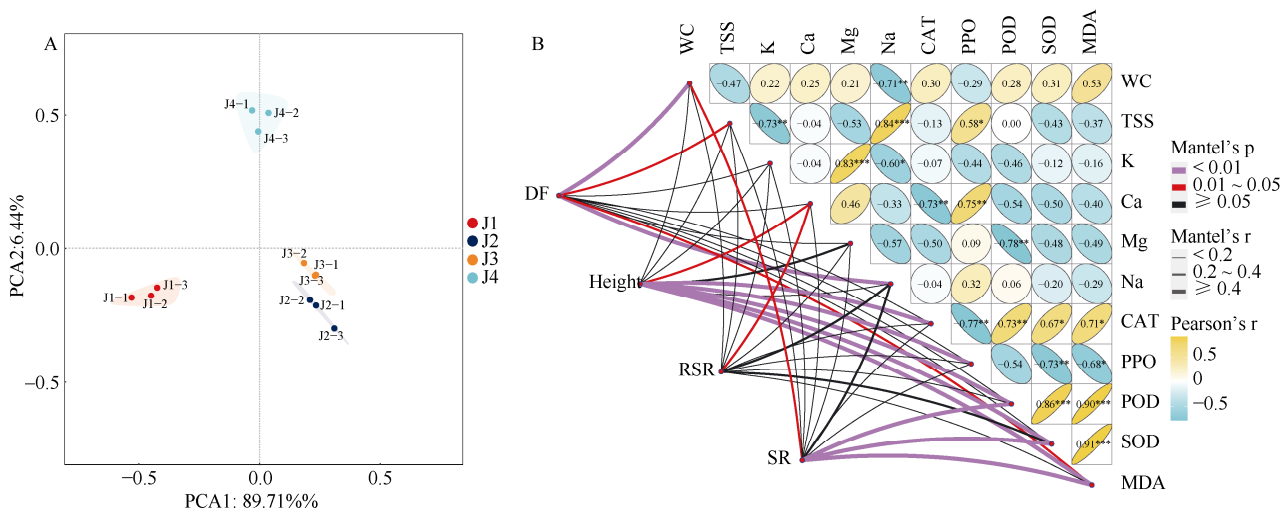


图 5 主成分分析(A)和 Mantel's 检验(B)。缩写见表 3。

Fig. 5 Principal component analysis (A) and Mantel's test (B) among different parameters. Abbreviation see Table 3.

前人^[21-23]的研究结果一致。J4 有利于实生苗成活,这可能是由于泥炭土添加改善了黄壤土的透气性和保水性,但是,实生苗的株高、叶面积等生长指标与 J1 存在差异,这可能是由于 J4 与 J1 的质地和营养存在差异性,影响植株根系对水分和营养物质的吸收效果,进而使得 2 种基质培育的实生苗生长存在差异; Mantel's 检验亦进一步证实植株成活率、生长指标与体内生理指标存在相关性。

可溶性糖为植物各种生命活动提供了所需的

物质和能量,其含量的多少与植物的代谢和营养水平有着密切的关系^[24-25]。J1 培育的实生苗体内可溶性糖含量较高,且 Mantel's 检验表明 TSS 与 DM:FM 间存在显著性相关,这些均说明基质培育的实生苗体内高含量的 TSS 为其生长提供了充足的代谢物质基础。J3 培育的实生苗体内可溶性糖含量亦较高,且与 J1 无显著差异,这可能是由于可溶性糖除了作为代谢底物外,还是重要的渗透调节物质之一,参与植物逆境的调控作用^[15-16];高含量可溶性糖有助

于缓解黄壤土培育的负作用,维持细胞膨压和正常代谢活动。这与前人^[2,7,15-16,26]的研究结果一致。矿质元素参与植物体内各种代谢活动,并起到信号传导、水分平衡调节等重要作用^[27]。这从本研究中亦进一步得以说明,即不同栽培基质下青钱柳实生苗体内矿质元素的含量和转运系数均存在差异性,其中,实生苗体内 Ca 含量显著高于 K、Mg、Na,且其在茎和叶内的含量高于根内的含量。这可能是由于不同栽培基质营造了不同的根际土壤环境特征,Ca 作为重要的信号和渗透调节物质,根部吸收的 Ca 通过茎秆木质部运输,优先向叶片分配,从而调节叶片气孔开闭、维持细胞膨压和重建植株体内离子平衡等来响应根际土壤环境效应^[28-31],这与 Mantel's 检验结果一致。J3 培育的实生苗体内 Mg 含量显著低于其他 3 种栽培基质,这可能是由于低含量 Mg 可降低蒸腾作用,减缓植物体内的物质代谢与能量转化,使植物维持正常生长^[32]。这亦可以解释 J3 培育的实生苗干物质积累与 J1 未达显著差异的原因。此外,J2、J3 培育的叶内 Mg 含量显著低于 J1、J4,这可能是引起 J2、J3 培育的实生苗株高生长缓慢的一个原因,因为 Mg 是叶绿素分子的核心原子及蛋白质合成中核糖亚基的桥接元件,低含量 Mg 减弱光合作用效率,进而引起植株生长缓慢^[28]。

抗氧化酶是植物体内活性氧、自由基清除系统的酶保护体系,通过 SOD、PPO、POD、CAT 等酶的协同作用,缓解或抑制膜脂过氧化的伤害,从而提高抗逆性^[33-37]。与前人^[33-38]研究结果一致,研究表明基质 J2 和 J3 培育的实生苗叶内 SOD、POD、CAT 活性高于基质 J1。这可能是由于 J2 和 J3 对植物细胞产生膜脂过氧化伤害,叶内高活性的 SOD、POD、CAT 协同降低膜脂过氧化伤害的程度,从而提高实生苗成活率和生长效率。这从 Mantel's 检验中进一步证实 SOD、POD 与 MDA 间存在显著相关性,且实生苗成活率、株高生长率亦与 SOD、POD 和 CAT 之间具有显著相关。但是,本研究中 J1 培育的实生苗叶内 PPO 活性显著高于其他 3 种栽培基质的,这可能是由于 PPO 是参与酚酸代谢合成途径的重要酶,青钱柳叶内富含黄酮、酚类等多种活性物质,高活性 PPO 有利于叶内活性物质合成,这与 Feng 等^[16]研究结果一致。

丙二醛是植物细胞膜脂过氧化的产物,其含量是判断植物细胞膜脂过氧化程度的重要指标。吴俊

宏等^[1]指出不同栽培下桔梗体内 MDA 含量不同。椰糠基质培育的蓝莓叶片内 MDA 含量高于草炭基质的^[39]。与前人^[1,39]的研究结果一致,本研究中亦发现不同栽培基质下实生苗叶内 MDA 含量不同,其中 J1 培育的实生苗叶内 MDA 含量最低,说明 J1 对实生苗细胞的过氧化伤害程度较弱;而 J2、J3 培育的实生苗体内 MDA 含量较高($\geq 50 \mu\text{mol/g}$),这可能是由于 J2、J3 内根际土壤对实生苗生长产生逆境胁迫,进而对实生苗细胞膜脂产生了较强的膜脂过氧化伤害。这亦可进一步解释为何 J2、J3 培育的实生苗叶内 SOD、POD 等抗氧化酶活性较高的原因。

综上,本研究以青钱柳实生苗为材料,在对实生苗成活率、生长指标、生理指标测定的基础上,采用指标隶属函数法、主成分分析和 Mantel's 检验分析的结果得出,泥炭土和珍珠岩(10:1, V:V)是适宜青钱柳实生苗培育的栽培基质。该栽培基质培育的实生苗成活率达到 100%,且植株长势一致、根系发达;实生苗体内细胞膜脂过氧化伤害程度低,PPO 活性高。

参考文献

- [1] YU Z Q, XIAO M, YANG Z D, et al. Effects of different cultivation substrates on growth of *Dalbergia odorifera* seedlings [J]. Hubei Agric Sci, 2023, 62(4): 98–102. [玉峙强, 小梅, 杨振德, 等. 不同栽培基质对降香黄檀幼苗生长的影响 [J]. 湖北农业科学, 2023, 62(4): 98–102. doi: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2023.04.017.]
- [2] WU J H, ZHANG W B, RONG H L, et al. Effects of different cultivation substrate on growth and physiological indexes of *Platycodon grandiflorus* seedlings [J]. Chin Wild Plant Res, 2023, 42(4): 56–61. [吴俊宏, 张文豹, 荣晗琳, 等. 不同栽培基质对桔梗幼苗生长及生理指标的影响 [J]. 中国野生植物资源, 2023, 42(4): 56–61. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2023.04.011.]
- [3] DU Y W, CHENG J Y, DENG X Z. Screening substrate formula for *Carya illinoensis* container seedlings [J]. Non-Wood For Res, 2021, 39(1): 227–233. [杜洋文, 程军勇, 邓先珍. 薄壳山核桃容器育苗基质配方筛选 [J]. 经济林研究, 2021, 39(1): 227–233. doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2021.01.027.]
- [4] XIA H T, WANG J W, CHEN Q X, et al. Effects of different substrate compositions on growth of container seedlings of *Phoebe bournei* and *Phoebe chekiangensis* [J]. For Sci Technol, 2020(10): 3–7. [夏海涛, 王金旺, 陈秋夏, 等. 不同基质配方对闽楠、浙江楠容器苗生长的影响 [J]. 林业科技通讯, 2020(10): 3–7. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.

- 2019.10.28.0002.]
- [5] XIE J, XU H Y, WU J T, et al. Effects of culture substrates on the growth of *Dendrobium officinale* [J]. Chin J Trop Crops, 2017, 38(1): 28–32. [谢静, 许环映, 吴建涛, 等. 栽培基质对铁皮石斛生长的影响 [J]. 热带作物学报, 2017, 38(1): 28–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2017.01.006.]
- [6] XU H B, SU Y, ZHANG J T, et al. Effect of different cultivation substrates on the growth of *Tibouchina granulosa* [J]. For Environ Sci, 2023, 39(3): 97–105. [许海波, 苏杨, 张俊涛, 等. 不同栽培基质对大花荣耀木生长的影响 [J]. 林业与环境科学, 2023, 39(3): 97–105. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2023.03.013.]
- [7] HU X J, ZENG Y Y, AO F X, et al. Effects of different substrates on growth and physiology of two species of *Dendrobium* [J]. J SW China Norm Univ (Nat Sci), 2019, 44(11): 29–35. [胡小京, 曾燕颖, 敖飞雄, 等. 不同栽培基质对两种石斛生长及生理的影响 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(11): 29–35. doi: 10.13718/j.cnki.xsxb.2019.11.005.]
- [8] FANG S Z, WANG J Y, WEI Z Y, et al. Methods to break seed dormancy in *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja [J]. Sci Hort, 2006, 110(3): 305–309. doi: 10.1016/j.scienta.2006.06.031.
- [9] XIE J H, XIE M Y, NIE S P, et al. Isolation, chemical composition and antioxidant activities of a water-soluble polysaccharide from *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja [J]. Food Chem, 2010, 119(4): 1626–1632. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.09.055.
- [10] YANG W X, LIU Y, FANG S Z, et al. Variation in growth, photosynthesis and water-soluble polysaccharide of *Cyclocarya paliurus* under different light regimes [J]. iForest, 2017, 10(2): 468–474. doi: 10.3832/for2185-010.
- [11] DENG B, SHANG X L, FANG S Z, et al. Integrated effects of light intensity and fertilization on growth and flavonoid accumulation in *Cyclocarya paliurus* [J]. J Agric Food Chem, 2012, 60(25): 6286–6292. doi: 10.1021/jf301525s.
- [12] LIU Y, FANG S Z, YANG W X, et al. Light quality affects flavonoid production and related gene expression in *Cyclocarya paliurus* [J]. J Photochem Photobiol B Biol, 2018, 179: 66–73. doi: 10.1016/j.jphoto.2018.01.002.
- [13] XU Q, ZHENG X J, XIE H F, et al. Effects of different cultivation substrates on growth and chemical compositions of annual *Cyclocarya paliurus* seedlings [J]. Modern Agric Sci Technol, 2023(3): 135–138. [徐谦, 郑晓杰, 谢鸿菲, 等. 不同栽培基质对一年生青钱柳苗生长及化学成分的影响 [J]. 现代农业科技, 2023(3): 135–138. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2023.03.034.]
- [14] TIAN N, FANG S Z, YANG W X, et al. Influence of container type and growth medium on seedling growth and root morphology of *Cyclocarya paliurus* during nursery culture [J]. Forests, 2017, 8(10): 387. doi: 10.3390/f8100387.
- [15] FENG Y, LIN X L, QIAN L W, et al. Morphological and physiological variations of *Cyclocarya paliurus* under different soil water capacities [J]. Physiol Mol Biol Plants, 2020, 26(8): 1663–1674. doi: 10.1007/s12298-020-00849-4.
- [16] FENG Y, ZHI L M, Pan H Y, et al. Shade improves seedling quality of ornamental *Cyclocarya* species under plastic greenhouse cultivation [J]. Ornament Plant Res, 2023, 3(1): 13. doi: 10.48130/OPR-2023-0013.
- [17] STEIN W I, EDWARDS J L, TINUS R W. Outlook for container-grown seedling use in reforestation [J]. J For, 1975, 73(6): 337–341. doi: 10.1093/jof/73.6.337.
- [18] LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 195–197. [李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 195–197.]
- [19] MENG X M. Professional substrate: Peat is the most important principle [J]. China Flow Hort, 2014(11): 18–19. [孟宪民. 专业基质: 泥炭是最重要的原料 [J]. 中国花卉园艺, 2014(11): 18–19.]
- [20] WANG F, WANG B, YU J H, et al. Comprehensive evaluation on substrates for lettuce soilless culture by membership function method [J]. Acta Agric Boreali-Occid Sin, 2020, 29(1): 117–126. [王飞, 王波, 郁继华, 等. 基于隶属函数法的油麦菜栽培基质综合评价 [J]. 西北农业学报, 2020, 29(1): 117–126. doi: 10.7606/j.issn.1004-1389.2020.01.014.]
- [21] YUE X H, MIAO L F, YANG F, et al. Morphological and physiological responses of *Dalbergia odorifera* T. Chen seedlings to different culture substances [J]. PLoS One, 2020, 15(5): e0232051. doi: 10.1371/journal.pone.0232051.
- [22] LIAN X J, WANG Y, LIANG X S, et al. Effects of different nutrient inputs on yield and quality of tomato and nutrient content of soil in greenhouse [J]. Modern Agric Sci Technol, 2020(13): 55–57. [廉晓娟, 王艳, 梁新书, 等. 不同养分投入对设施番茄产量与质量和土壤养分含量的影响 [J]. 现代农业科技, 2020(13): 55–57. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2020.13.032.]
- [23] FENG X L, ZHAO X H, YUE L. Comparison on physiochemical properties of three culture substrates and their effects on the growth of *Clivia miniata* [J]. Mol Plant Breed, 2023, 21(13): 4382–4387. [冯秀丽, 赵兴华, 岳玲. 三种栽培基质的理化性质比较及其对君子兰生长的影响 [J]. 分子植物育种, 2023, 21(13): 4382–4387. doi: 10.13271/j.mpb.021.004382.]
- [24] LIU J Y, LIN S W, PAN J Y, et al. Different improved soil substrates on

- the growth and physiological characters of seedlings from *Trollius chinensis* Bunge [J]. Bull Bot Res, 2021, 41(6): 928–937. [刘金玉, 林声威, 潘景玉, 等. 不同土壤改良基质对金莲花幼苗生长及生理指标的影响 [J]. 植物研究, 2021, 41(6): 928–937. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2021.06.011.]
- [25] ZHANG Z Z, HE W Z. The physiological responds of different culture substrates of blueberries to drought stress and the comprehensive evaluation on their drought resistance capacity [J]. J Zhejiang Ocean Univ (Nat Sci), 2021, 40(2): 181–188. [张真真, 贺位忠. 干旱胁迫下不同栽培基质蓝莓的生理响应及其抗旱性综合评价 [J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 181–188. doi: 10.3969/j.issn.1008-830X.2021.02.013.]
- [26] WANG L, ZHANG Y B, LI J X. The effect of different culture substrates on photosynthesis and physiology of *Paris polyphylla* [J]. Jiangsu Agric Sci, 2016, 44(1): 216–219. [王岚, 张宇斌, 李建新. 不同栽培基质对七叶一枝花光合特性、生理特性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 216–219. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2016.01.064.]
- [27] LI B, XU W Y, SHI S L. Effects of polyethylene glycol stress on ion contents in nutritive organs of alfalfa seedlings [J]. J Zhejiang Univ (Agric Life Sci), 2017, 43(1): 65–72. [李波, 徐婉玉, 石善亮. 聚乙二醇渗透胁迫对苜蓿幼苗营养器官离子含量的影响 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(1): 65–72. doi: 10.3785/j.issn.1008-9209.2016.06.101.]
- [28] JIN N, JIN L, LÜ J, et al. Effect of different irrigation limits on accumulation and distribution of mineral elements and water use of cucumber cultivated in substrate [J]. J Gansu Agric Univ, 2022, 57(2): 43–53. [金宁, 金莉, 吕剑, 等. 不同灌水下限对基质栽培黄瓜矿质元素积累分配及水分利用的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(2): 43–53. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2022.02.006.]
- [29] YUAN Z J, SHEN Y J. Estimation of agricultural water consumption from meteorological and yield data: A case study of Hebei, north China [J]. PLoS One, 2013, 8(3): e58685. doi: 10.1371/journal.pone.0058685.
- [30] PER T S, KHAN N A, REDDY P S, et al. Approaches in modulating proline metabolism in plants for salt and drought stress tolerance: Phytohormones, mineral nutrients and transgenics [J]. Plant Physiol Biochem, 2017, 115: 126–140. doi: 10.1016/j.plaphy.2017.03.018.
- [31] GAO C J, XIA X J, SHI K, et al. Response of stomata to global climate changes and the underlying regulation mechanism of stress responses [J]. Plant Physiol J, 2012, 48(1): 19–28. [高春娟, 夏晓剑, 师恺, 等. 植物气孔对全球环境变化的响应及其调控防御机制 [J]. 植物生理学报, 2012, 48(1): 19–28. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2012.01.013.]
- [32] LU J Y, XIONG J B, ZHANG H S, et al. Effects of water stress on yield, quality and trace element composition of alfalfa [J]. Acta Pratac Sin, 2020, 29(8): 126–133. [陆皎云, 熊军波, 张鹤山, 等. 水分胁迫对紫花苜蓿产量、品质和微量元素的影响 [J]. 草业学报, 2020, 29(8): 126–133. doi: 10.11686/cyxb2019462.]
- [33] LIMÓN-PACHECO J, GONSEBATT M E. The role of antioxidants and antioxidant-related enzymes in protective responses to environmentally induced oxidative stress [J]. Mutat Res, 2009, 674(1/2): 137–147. doi: 10.1016/j.mrgentox.2008.09.015.
- [34] QU J S, ZHANG L J, ZHU Q N, et al. Effects of water stress on growth and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings under substrate culture of *Caragana korshinskii* [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2019, 35(2): 384–390. [曲继松, 张丽娟, 朱倩楠, 等. 水分胁迫对柠条基质栽培黄瓜幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 384–390. doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.02.020.]
- [35] SHEN L F, XU Y Y, HUANG X L, et al. Effects of *p*-hydroxybenzoic acid and cinnamic acid on the growth and the physiological indexes of seedlings of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* No. 9 [J]. J SW For Univ, 2020, 40(6): 19–26. [申礼凤, 徐圆圆, 黄晓露, 等. 对羟基苯甲酸和肉桂酸对巨尾桉 9 号苗木生长及生理指标的影响 [J]. 西南林业大学学报, 2020, 40(6): 19–26. doi: 10.11929/j.swfu.201908018.]
- [36] HASANUZZAMAN M, RAKIB HOSSAIN RAIHAN M, KHOJAH E, et al. Biochar and chitosan regulate antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems and enhance salt tolerance in jute (*Corchorus olitorius* L.) [J]. Antioxidants, 2021, 10(12): 2017. doi: 10.3390/antiox10122017.
- [37] MEHMOOD S, AHMED W, IKRAM M, et al. Chitosan modified biochar increases soybean (*Glycine max* L.) resistance to salt-stress by augmenting root morphology, antioxidant defense mechanisms and the expression of stress-responsive genes [J]. Plants, 2020, 9(9): 1173. doi: 10.3390/plants9091173.
- [38] LI G Z, ZHU Y J, ZHOU S C, et al. Physiological indices at low temperature stress for two types of *Phoebe zhennan* [J]. J Zhejiang Agric A&F Univ, 2017, 34(2): 310–318. [李高志, 朱亚军, 周生财, 等. 2 种叶型桢楠对低温胁迫的生理响应及耐寒性分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 310–318. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2017.02.015.]
- [39] GU J Y, HUANG G H, SU H, et al. Screening study on substrates for cultivation of southern highbush blueberry [J]. Decid Fruits, 2023, 55(2): 31–33. [顾嘉怡, 黄国辉, 苏宏, 等. 南高丛蓝莓栽培基质筛选研究 [J]. 落叶果树, 2023, 55(2): 31–33. doi: 10.13855/j.cnki.lygs.2023.02.007.]