

欧洲鹅耳枥水培营养液适用效果比较研究

火艳¹, 张慧会¹, 祝遵凌^{1,2*}

(1.南京林业大学风景园林学院, 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037;
2.南京林业大学艺术设计学院, 江苏 南京 210037)

摘要:【目的】探究常用水培营养液的种类、浓度、pH, 以及专用营养液对欧洲鹅耳枥水培苗生长的影响, 筛选适合欧洲鹅耳枥水培苗生长的最佳营养液, 为欧洲鹅耳枥的水培繁殖、生产应用及进一步生理生化研究提供理论依据。【方法】以欧洲鹅耳枥水培苗为试材, 以存活率、叶片数、平均根数、平均二级根数和根鲜质量为形态指标, 以可溶性糖、淀粉含量、可溶性蛋白含量、POD 活性和根系活力为生理指标, 采用 3 因素 3 水平正交试验研究了常用营养液种类及其浓度、pH 对水培苗生长的影响。在筛选出最佳常用营养液的基础上, 采用单因素试验研究了最佳常用营养液与自制专用营养液对欧洲鹅耳枥水培苗生长的影响。【结果】营养液正交试验表明, 理论上适合欧洲鹅耳枥水培苗生长的常用营养液为 1/4 浓度的 Hewitt 通用配方 (A3B3), 在 pH 6.5 的该营养液中欧洲鹅耳枥水培苗存活率为 85.71%, 叶片数为 1.60, 平均根数为 4.40, 平均二级根数为 25.90, 根鲜质量为 0.40 g, 水培苗的可溶性糖含量、淀粉含量、可溶性蛋白含量和根系活力显著较其他处理高, POD 活性显著较其他处理低。最佳常用营养液与专用营养液的对比试验表明, 最适合欧洲鹅耳枥水培苗生长的营养液为作者自行配制的专用配方 1, 在该营养液中欧洲鹅耳枥水培苗存活率为 93.33%, 可溶性糖含量 0.13 mg/g, 淀粉含量 2.55 mg/g, 可溶性蛋白含量 33.33 mg/g, 根系活力 49.75 μg/(g·h)。【结论】最适合欧洲鹅耳枥水培苗生长的营养液为作者自行配制的专用配方 1。

关键词:欧洲鹅耳枥; 水培; 营养液; 根生长; 可溶性糖含量

中图分类号: S718; S687 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):
文章编号: 1000-2006(2021)02-0017-08



Comparative study on the effects of nutrient solution treatment in hydroponic cultivation of *Carpinus betulus*

HUO Yan¹, ZHANG Huihui¹, ZHU Zunling^{1,2*}

(1.Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2.College of Art and Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: 【Objective】To provide a theoretical basis for hydroponic breeding, production, and further physiological and biochemical studies of *Carpinus betulus*, the effects of type, concentration and pH of ordinary nutrient solution treatment and special nutrient solution for hydroponic seedling growth of *C. betulus* were examined, and the best nutrient solution for the growth of *C. betulus* seedlings was screened. 【Method】We used *C. betulus* hydroponic seedlings as the test material. We analyzed the survival rate, number of leaves, average number of roots, average number of second roots and fresh root weight as morphological indexes; and soluble sugar content, starch content, soluble protein content, POD activity and root activity as physical indexes. Hydroponic seedling growth was examined by the type, concentration and pH value of nutrient solution treatment using three factors and three level orthogonal tests. To obtain the best ordinary nutrient solution, we tested hydroponic seedling growth treated with the best ordinary nutrient solutions and special nutrient solutions made by the authors using a single factor test. 【Result】The orthogonal test of nutrient solution showed that the

收稿日期 Received: 2019-11-11 修回日期 Accepted: 2020-12-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(31770752); 林业科技成果国家级推广项目(2019133119); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 江苏省“333 工程”项目(BRA2018065); 江苏省科技支撑计划(BM2013478)。

第一作者: 火艳(yanhua@njfu.edu.cn), 博士生。* 通信作者: 祝遵凌(zhuzunling@njfu.edu.cn), 教授, ORCID(0000-0003-1796-8408)。
引文格式: 火艳, 张慧会, 祝遵凌. 欧洲鹅耳枥水培营养液适用效果比较研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 17-24. HUO Y, ZHANG H H, ZHU Z L. Comparative study on the effects of nutrient solution treatment in hydroponic cultivation of *Carpinus betulus*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(2): 17-24. DOI:10.12302/j.issn.1000-2006.201911011.

most suitable ordinary nutrient solution was the 1/4 Hewitt formula (A3B3). In this condition of pH 6.5, the survival rate was 85.71%, the number of leaves was 1.60, the average number of roots was 4.40, the average number of second roots was 25.90, and the fresh root weight was 0.40 g. The soluble sugar content, starch content, soluble proteins content, and the rooting activity were significantly higher than those in the other treatments, although the POD activity was significantly lower than that in the other treatment. The single factor test of the nutrient solutions showed that the most suitable nutrient solution for *C. betulus* growth was the special nutrient solution No. 1. Under this condition, the survival rate was 93.33%, the soluble sugar content was 0.13 mg/g, the starch content was 2.55 mg/g, the soluble proteins content was 33.33 mg/g, and the rooting activity was 49.75 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$.【Conclusion】The most suitable nutrient solution for *C. betulus* was the special nutrient solution No.1 prepared by us.

Keywords: *Carpinus betulus*; hydroponic culture; nutrient solution; roots growth; soluble sugar content

欧洲鹅耳枥(*Carpinus betulus*)为桦木科鹅耳枥属落叶阔叶乔木,树冠丰满、枝叶浓密、质地细腻、秋季色叶金黄、果穗黄褐色,且抗寒、耐盐、耐贫瘠、适应性广、病虫害少,国外广泛应用于园林、道路绿化及生态防护^[1-5],国内因缺乏欧洲鹅耳枥苗木而应用不多。欧洲鹅耳枥种子具有休眠性,即使经过层积处理,种子的发芽率也低于60%^[6]。Maynard等^[7]对欧洲鹅耳枥扦插苗进行解剖学研究发现,次生木质部与韧皮部越宽、周皮越厚、石细胞越多,其扦插生根能力越弱。经黄化、绑扎及生长素处理后生根率可增加,但扦插繁殖生根时间长^[7-8]。本课题组在对欧洲鹅耳枥引种驯化过程中发现扦插生根困难,且夏季扦插极易污染。

植物水培生根繁殖是以营养液作基质扦插繁殖花木,并使之产生新根成为独立植物体的方法^[9],栽培过程高效、清洁,还适合观赏根系。营养液是水培植物根部赖以生存的重要环境,其中适宜的矿质离子配比和pH调控是水培的关键性技术^[10-11]。因此,本研究通过不同营养液种类及其浓度、pH,以及自行配制的营养液配方进行欧洲鹅耳枥水培扦插生根试验,比较扦插苗生长特性及生理指标的变化,寻求适合欧洲鹅耳枥水培的营养液类型,以期在欧洲鹅耳枥的扩繁生产及推广应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料及营养液配制

试验材料是以树龄为15 a的欧洲鹅耳枥2~3年生硬枝茎段为插穗,经过8周的硬枝水插生根后得到的水培苗。

常用营养液为Hoagland & Aronson通用配方(1938)、日本园试配方(1966)、Hewitt通用配方(1952);欧洲鹅耳枥专用营养液为自制(专用配方1见文献[12])。

营养液的配制方法:按配比,取四水硝酸钙配制成50倍母液a,取硝酸钾、七水硫酸镁、磷酸二

氢铵配制成50倍母液b,取EDTA-铁、硼酸、硫酸锰、七水硫酸锌、五水硫酸铜、钼酸铵配制成100倍母液c,取柠檬酸配制成1 mol/L母液d;取NaOH配制成1 mol/L母液e。在容器中加入蒸馏水至所需体积的1/2时,先将母液a倒入容器中搅拌均匀,然后将母液b倒入容器中搅拌均匀,再将母液c倒入容器中搅拌,待均匀后,继续加入蒸馏水达到总体积的4/5左右,用母液d和母液e调节溶液pH并继续搅拌,直至pH为6.5~7.5;最后加蒸馏水至所需体积。

微量元素为:20 mg/L的NaFe-EDTA、2.86 mg/L的 H_3BO_3 、1.61 mg/L的 $\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ 、0.22 mg/L的 $\text{ZnSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$ 、0.08 mg/L的 $\text{CuSO}_4\cdot5\text{H}_2\text{O}$ 和0.02 mg/L的 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot4\text{H}_2\text{O}$ 。

1.2 试验设计

1) 常用营养液正交试验。常用营养液正交试验从营养液的种类(A)、浓度(B)、pH(C)3方面研究对水培苗生长的影响。采用3因素3水平的正交试验设计。营养液种类的3水平A1、A2、A3为Hoagland & Aronson通用配方1938、日本园试配方1966和Hewitt通用配方1952,营养液浓度3水平B1、B2、B3为1、1/2、1/4,pH的3水平C1、C2、C3为5.5、6.5、7.5。

每处理14个枝条,重复3次。水培苗固定于EPS泡沫板,置于通气的营养液中,室内培养温度25~26℃,每2周换水1次。

2) 欧洲鹅耳枥专用营养液试验。欧洲鹅耳枥专用营养液试验采用单因素方法,对比欧洲鹅耳枥水培苗在自行研制的欧洲鹅耳枥水培苗专用配方1、专用配方2与A3B3C2营养液中的形态与生理指标,每处理3个重复,每重复14株植株。水培苗固定于EPS泡沫板,置于通气的营养液中,室内培养温度25~26℃,每2周换水1次。

1.3 指标测定与数据处理

欧洲鹅耳枥水培苗培养60 d后统计存活率、

叶片数、平均根数、平均二级根数、根鲜质量,测定其根的根系活力、可溶性糖含量、淀粉含量、可溶性蛋白含量、POD 活性。可溶性糖含量 (mg/g) 和淀粉含量 (mg/g) 采用蒽酮比色法^[13],可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝染色法^[13],POD 活性 (U/g) 采用愈创木酚法^[14],根系活力 [μg/(g·h)] 采用 TTC 比色法^[15]测定。

试验结果采用 SPSS 软件统计分析。方差齐性检验后多样本均数比较采用单因素方差分析,均数间两两比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 常用营养液正交处理对欧洲鹅耳枥水培苗生长的影响

2.1.1 生根形态指标及其相关性分析

采用常用营养液进行水培试验,欧洲鹅耳枥茎段生根情况见表 1。由表 1 可知,营养液为 1/4 浓度、pH 7.5 的 Hoagland & Anon 通用配方

(A1B3C3)时,水培苗生根存活率最高,为 92.86%;营养液为 1/4 浓度、pH 5.5 的日本园试配方(A2B3C1)时,叶片数增加最多,为 1.63;营养液为 1/4 浓度、pH 6.5 的 Hewitt 通用配方(A3B3C2)时,平均根数最多,为 4.40;且平均二级根数亦最多,为 25.90;营养液为 1 倍浓度、pH 7.5 的 Hewitt 通用配方(A3B1C3)时,根鲜质量最大,为 0.44 g。

多重比较结果显示(表 2),最适合提高存活率的营养液为 1/4 浓度、pH 7.5 的 Hewitt 通用配方(A3B3C3),提高叶片数的营养液为 1/4 浓度、pH 5.5 的 Hoagland & Anon 通用配方(A1B3C1)和 1/4 浓度、pH 5.5 的 Hewitt 通用配方(A3B3C1),提高平均根数的营养液为 1/4 浓度、pH 6.5 的 Hewitt 通用配方(A3B3C2),提高平均二级根数的营养液为 1/4 浓度、pH 7.5 的 Hewitt 通用配方(A3B3C3),提高根鲜质量的营养液为含有 Hewitt 通用配方(A3)或 Hoagland & Anon 通用配方(A1)的组合。

表 1 常用营养液处理下欧洲鹅耳枥水培苗的形态指标

Table 1 Results of morphological indexes of hydroponic seedling of *Carpinus betulus* under ordinary nutrient solution treatment

处理 treatment	存活率/% survival rate	叶片数 leaf number	平均根数 average root number	平均二级根数 average second root number	根鲜质量/g fresh root weight
A1B1C1	64.29±0.71 Ed	1.30±0.02 Cc	1.44±0.03 Ee	7.47±0.02 Ff	0.37±0.02 ABabc
A1B2C2	64.20±0.55 Ed	1.32±0.02 Cc	2.00±0.05 Cc	6.09±0.04 Gg	0.43±0.04 Aab
A1B3C3	92.86±0.14 Aa	1.59±0.02 Aa	2.31±0.04 Bb	18.83±0.08 Cc	0.36±0.04 ABCbc
A2B1C2	42.86±2.86 Fe	0.80±0.10 Ef	1.33±0.05 Ef	1.99±0.11 Hh	0.25±0.05 Cd
A2B2C3	64.29±1.67 Ed	1.11±0.04 De	1.67±0.07 Dd	6.14±0.04 Gg	0.33±0.02 ABCcd
A2B3C1	78.57±2.57 CDe	1.63±0.02 Aa	2.27±0.06 Bb	14.60±0.04 Dd	0.27±0.07 BCd
A3B1C3	83.33±1.67 BCb	1.20±0.03 Dd	1.97±0.05 Cc	19.81±0.05 Bb	0.44±0.06 Aa
A3B2C1	78.57±3.50 Dc	1.45±0.04 Bb	2.33±0.05 Bb	13.16±0.04 Ee	0.40±0.09 Aabc
A3B3C2	85.71±2.29 Bb	1.60±0.03 Aa	4.40±0.05 Aa	25.90±0.03 Aa	0.40±0.03 Aabc

注:同列不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$),不同大写字母表示差异达极显著水平($P<0.01$)。下同。Different lowercase letters in the same column represents the difference was significant ($P<0.05$),different uppercase letters in the same column represents the difference was significant ($P<0.01$).The same below.

表 2 常用营养液处理各因子对欧洲鹅耳枥水培苗形态指标影响的多重比较

Table 2 Multiple comparisons for morphological indexes on hydroponic seedling of *C. betulus* under different ordinary nutrient solution treatment

因子 factor	存活率/% survival rate	叶片数 leaf number	平均根数 average root number	平均二级根数 average second root number	根鲜质量/g fresh root weight
A1	74.20±14.01 Bb	1.40±0.14 Aa	1.92±0.38 Bb	10.80±6.05 Bb	0.39±0.04 Aa
A2	61.59±15.66 Cc	1.18±0.37 Bb	1.76±0.42 Bb	7.58±5.57 Cc	0.28±0.06 Bb
A3	81.85±4.71 Aa	1.42±0.18 Aa	2.90±1.14 Aa	19.62±5.52 Aa	0.41±0.06 Aa
B1	63.49±17.62 Cc	1.10±0.24 Cc	1.58±0.30 Cc	9.76±7.90 Bb	0.35±0.09 Aa
B2	68.43±6.43 Bb	1.30±0.15 Bb	2.00±0.29 Bb	8.46±3.52 Bb	0.39±0.06 Aa
B3	85.71±6.42 Aa	1.61±0.03 Aa	2.99±1.06 Aa	19.78±4.94 Aa	0.34±0.07 Aa
C1	63.49±7.04 Cc	1.46±0.15 Aa	2.02±0.43 Bb	11.74±3.27 Bb	0.35±0.08 Aa
C2	68.43±18.66 Bb	1.24±0.36 Bb	2.58±1.40 Aa	11.33±11.07 Bb	0.36±0.09 Aa
C3	85.71±13.11 Aa	1.30±0.22 Bb	1.98±0.28 Bb	14.93±6.60 Aa	0.38±0.06 Aa

综合各形态指标的多重比较分析可知,理论上,最适合欧洲鹅耳枥水培苗生长的营养液配方是1/4浓度的Hewitt通用配方(A3B3);从存活率、平均二级根数、根鲜质量分析,营养液在pH 7.5时最佳,但从叶片数分析,在pH 5.5时最佳,从平均根数分析,在pH 6.5时最佳。

在常用营养液正交处理下,欧洲鹅耳枥水培苗的存活率与叶片数、平均根数、平均二级根数之间存在极显著的相关性(表3),说明叶片能否保留是

表 3 常用营养液处理的欧洲鹅耳枥水培苗形态指标相关性分析

Table 3 Correlation analysis for morphological indexes of hydroponic seedling of *C. betulus* under ordinary nutrient solution treatment

指标 index	存活率 survival rate	叶片数 leaf number	平均根数 average root number	平均二级 根数 average second root number	根鲜质量 fresh root weight
存活率					
叶片数	0.836 **				
平均根数	0.613 **	0.644 **			
平均二级根数	0.892 **	0.705 **	0.811 **		
根鲜质量	0.454 *	0.282	0.275	0.359	

注: *、**表示0.05和0.01水平下差异显著。下同。* and ** indicated significant differences between treatments at $P<0.05$, $P<0.01$. The same below.

表 4 常用营养液处理下欧洲鹅耳枥水培苗生理指标的变化

Table 4 Results of physical indexes of hydroponic seedling of *C. betulus* under ordinary nutrient solution treatment

处理 treatment	可溶性糖含量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) soluble sugar content	淀粉含量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) starch content	可溶性蛋白含量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) soluble proteins content	POD 活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$) POD activity	根系活力/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) root activity
A1B1C1	0.12±0.00 Aa	2.30±0.22 BCbc	19.23±0.31 Df	86.66±11.55 Ce	19.23±3.00 Df
A1B2C2	0.11±0.01 ABab	2.03±0.07 BCc	49.00±0.43 Aa	183.33±15.28 b	49.00±3.00 Aa
A1B3C3	0.13±0.02A Bab	2.00±0.08 Cc	38.13±0.09 Bb	40.00±10.00 Ce	38.13±3.00 Bb
A2B1C2	0.08±0.01 Cc	2.51±0.07 Bb	10.55±0.12 Eg	270.00±79.37 Aa	10.55±2.00 Eg
A2B2C3	0.08±0.01 Cc	3.04±0.14 Aa	31.68±0.39 BCed	220.00±20.00 ABab	31.68±4.04 BCed
A2B3C1	0.12±0.02 Aa	2.23±0.06 BCbc	35.29±0.19 BCbc	233.33±23.09 ABab	35.29±3.00 BCbc
A3B1C3	0.10±0.02 ABCbc	2.22±0.11 BCbc	31.25±0.93 BCed	93.33±11.55 Cc	31.25±3.51 BCed
A3B2C1	0.12±0.01 ABab	2.21±0.08 BCbc	36.88±0.18 Bbc	60.00±20.00 Cc	36.88±3.00 Bbc
A3B3C2	0.08±0.02 BCc	2.34±0.56 BCbc	28.70±1.996 Cd	220.00±26.46 ABab	28.76±3.00 Cd

为含有Hewitt通用配方(A3)或日本园试配方(A2)的组合;最适合提高可溶性蛋白含量的营养液为pH 5.5的Hewitt通用配方(A3C1)或pH 7.5的Hewitt通用配方(A3C3)组合;最适合降低POD活性的营养液为含有Hewitt通用配方(A3)或Ho-

欧洲鹅耳枥水培苗存活的基础,根系各部分的数量也决定水培苗的存活率。根鲜质量与存活率存在显著的相关性,说明根系质量是存活的关键。综上所述,根系的数量、质量,以及叶片量是欧洲鹅耳枥水培苗存活的重要保证。

2.1.2 生根生理指标及其相关性分析

常用营养液正交处理下,欧洲鹅耳枥水培苗生理指标的变化见表4。由表4可知,营养液浓度为B1水平、pH 5.5的Hoagland & Anon通用配方(A1B1C1)和浓度B3水平、pH 5.5的日本园试配方(A2B3C1)时,水培苗可溶性糖含量最高,为0.12 mg/g;营养液为1/2浓度、pH 7.5的日本园试配方(A2B2C3)时,淀粉含量最高,为3.04 mg/g;营养液为1/2浓度、pH 5.5的Hoagland & Anon通用配方(A1B2C1)时,可溶性蛋白含量最高,为49.00 mg/g;营养液为1/4浓度、pH 7.5的Hoagland & Anon通用配方(A1B3C3)时,POD活性最低,为40.00 U/g;营养液为1/2浓度、pH 6.5的Hoagland & Anon通用配方(A1B2C2)时,根系活力最高,为49.00 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。

多重比较结果显示(表5),最适合提高水培苗可溶性糖含量的营养液为pH 5.5的Hoagland & Anon通用配方(A1C1)或pH 5.5的Hewitt通用配方(A3C1)的组合,最适合提高淀粉含量的营养液

agland & Anon通用配方(A1),以及含有pH 5.5(C1)或pH 7.5(C3)的组合;最适合提高根系活力的营养液为含有Hewitt通用配方(A3)或Hoagland & Anon通用配方(A1),以及1/2浓度(B2)或1/4浓度(B3)的组合。

表 5 常用营养液处理各因子对欧洲鹅耳枥水培苗生理指标影响的多重比较

Table 5 Multiple companisons for rooting indexes of hydroponic seedling of *C. betulus* under ordinary nutrient solution treatment

因子 factor	可溶性糖含量/ (mg·g ⁻¹) soluble sugar content	淀粉含量/ (mg·g ⁻¹) starch content	可溶性蛋白含量/ (mg·g ⁻¹) soluble proteins content	POD 活性/ (U·g ⁻¹) POD activity	根系活力/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹) root activity
A1	0.11±0.01 Aa	2.11±0.19 Bb	36.39±0.32 Bb	103.33±64.23 Bb	35.45±13.30 Aa
A2	0.09±0.02 Bb	2.59±0.37 Aa	35.45±0.67 Bc	241.11±48.07 Aa	25.84±11.89 Bb
A3	0.10±0.02 Ab	2.25±0.29 Ab	37.92±1.30 Aa	124.44±75.18 Bb	32.30±4.53 Aa
B1	0.10±0.02 Aa	2.34±0.18 Aa	36.50±1.63 Aa	150.00±98.74 Aa	20.34±9.35 Bb
B2	0.10±0.02 Aa	2.43±0.48 Aa	37.00±1.17 Aa	154.44±74.35 Aa	39.19±8.23 Aa
B3	0.10±0.02 Aa	2.19±0.32 Aa	36.27±1.18 Ab	164.44±95.28 Aa	34.06±4.91 Aa
C1	0.12±0.01 Aa	2.25±0.13 Aa	36.89±1.30 Aa	126.67±82.46 Bb	30.47±8.85 Aa
C2	0.09±0.02 Bb	2.29±0.35 Aa	36.03±1.47 Ab	224.44±56.81 Aa	29.44±16.82 Aa
C3	0.09±0.02 Bb	2.42±0.48 Aa	36.84±1.17 Aa	117.78±81.05 Bb	33.69±4.53 Aa

综合各生理指标的多重比较可知,理论上,最适合欧洲鹅耳枥水培苗生长的营养液配方是 1/4 浓度的 Hewitt 通用配方 (A3B3)。其中:从可溶性糖含量、淀粉含量、可溶性蛋白含量、POD 活性和根系活力分析,Hewitt 通用配方促使可溶性糖含量、淀粉、可溶性蛋白含量增加,降低了 POD 活性并升高了根系活力,说明 Hewitt 通用配方有利于插穗营养物质的积累,且抗逆反应小;从营养液浓度方面分析,1/4 低浓度有利于根系活力的增加;从营养液 pH 方面分析,pH 5.5 或 pH 7.5 有利于提高可溶性糖和可溶性蛋白含量,降低 POD 活性。

常用营养液处理下,欧洲鹅耳枥水培苗生根生理指标相关性分析见表 6,结果表明,可溶性糖含量与淀粉含量之间存在极显著负相关,是由于可溶性糖与淀粉可相互转化;可溶性蛋白含量与 POD 活性之间存在极显著负相关,说明可溶性蛋白含量

与水培苗的抗性反应呈极显著拮抗;可溶性糖与 POD 活性存在显著负相关,说明可溶性糖含量与水培苗的抗性反应呈显著拮抗;淀粉与 POD 活性存在显著相关,说明淀粉含量与水培苗的抗性反应关系密切,表现为相互促进。

2.2 专用营养液处理对欧洲鹅耳枥水培苗生长的影响

2.2.1 生根形态指标的比较

专用营养液处理下,欧洲鹅耳枥水培苗生长的形态指标见图 1。

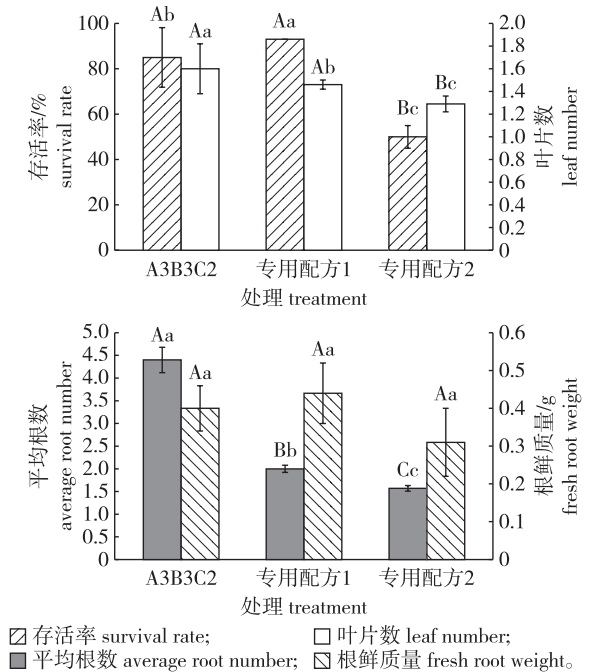


图 1 不同营养液对欧洲鹅耳枥水培苗形态指标的影响

Fig.1 Effects of different nutrient solutions on morphological indexes of hydroponic seedling of *C. betulus*

表 6 常用营养液处理下欧洲鹅耳枥水培苗生根生理指标相关性分析

Table 6 Correlation analysis for rooting physiological indexes of hydroponic seedling of *C. betulus* under ordinary nutrient solution treatment

指标 index	可溶性糖 含量 soluble sugar content	淀粉含量 starch content	可溶性 蛋白含量 soluble proteins content	POD 活性 POD activity	根系活力 root activity
可溶性糖含量					
淀粉含量	-0.544 **				
可溶性蛋白含量	0.136	-0.011			
POD 活性	-0.407 *	0.465 *	-0.516 **		
根系活力	0.282	-0.330	0.278	-0.250	

专用配方 1 处理下水培苗的存活率显著高于 A3B3C2 和专用配方 2 的存活率;专用配方 1 的叶片数与 A3B3C2 的叶片数没有显著差异,两者显著高于专用配方 2 的叶片数;A3B3C2 的平均根数显著高于专用配方 1 的平均根数,专用配方 1 的平均根数显著高于专用配方 2 的平均根数;专用配方 1 的根鲜质量与 A3B3C2、专用配方 2 的根鲜质量没有显著差异。综合存活率、叶片数、根鲜质量来看,欧洲鹅耳枥水培苗适合在专用配方 1 中生长,但从平均根数看,欧洲鹅耳枥水培苗适合在 A3B3C2 配方处理下生长。

2.2.2 生根生理指标的比较

专用营养液水培试验中欧洲鹅耳枥水培苗生理指标的变化见图 2。专用配方 1 处理的可溶性糖含量显著高于 A3B3C2 和专用配方 2 处理的可溶性糖含量。专用配方 1 处理的可溶性蛋白与 A3B3C2、专用配方 2 的可溶性蛋白没有显著差异。专用配方 1 处理的 POD 活性显著低于 A3B3C2 和专用配方 2 的 POD 活性。专用配方 1 处理的根系活力显著高于 A3B3C2 和专用配方 2 的根系活力。综合 4 项生理指标来看,专用配方 1 处理的可溶性糖含量、根系活力显著性水平均为最高,POD 活性显著性水平最低,说明欧洲鹅耳枥水培苗在专用配

方 1 中营养积累多且生理活性高。

3 讨 论

常用营养液正交筛选试验的目的是筛选适合欧洲鹅耳枥水培苗生长发育的常用营养液配方,综合形态指标和生理指标分析发现,1/4 浓度的 Hewitt 通用配方为正交试验筛选出的理论最佳常用营养液配方。将 1/4 浓度的 Hewitt 通用配方与自行配制的专用配方 1、专用配方 2 做对比,综合存活率等重要形态指标和生理指标发现,专用配方 1 是最适合欧洲鹅耳枥水培苗存活、生长及营养积累的营养液配方,可用于欧洲鹅耳枥水培苗育苗生产及进一步生理生化试验研究^[16-17]。

营养液是水培植物赖以生存的生长发育环境,不同种类、浓度及 pH 的营养液对水培植物产量、品质及观赏性状有较大的影响^[18-19]。多种绿叶蔬菜、花卉及木本植物的无土栽培曾采用 Hoagland & Aron 配方、日本园试配方、Hewitt 通用配方,以及自行配制的专用配方等^[20]。安娜等^[21]发现 Hewitt 通用配方使雾培番茄 (*Solanum lycopersicum*) 植株的长势更为旺盛,其茎粗、根系长度、根系体积、根冠比、叶绿素含量等指标最大;石磊等^[22]发现长寿花 (*Kalanchoe blossfeldiana*) 在 Hoagland&Aron 配方中生长良好并具有较好的观赏价值,且在 1/4 浓度中有最强的分生能力;丁文雅等^[19]发现是华南农大叶菜 B 营养液适合生菜 (*Lactuca sativa*) 的气雾栽培,而英国 Hewitt 通用配方和日本山崎配方不适合生菜的气雾栽培。本研究发现,理论上,适合欧洲鹅耳枥水培苗生长的常用营养液为 Hewitt 通用配方,这与对雾培番茄^[21]、无花果 (*Ficus carica*)^[23] 等的研究结果一致,其原因可能与 Hewitt 通用配方以硝态氮为唯一氮源且含钙量较其他营养液更高有关^[24]。同时,本研究也发现,最适合欧洲鹅耳枥水培苗生长的营养液为自行配制的专用配方 1,其可促进营养物质的积累,降低抗逆反应,使得根生长状况良好,为欧洲鹅耳枥的育苗生产及进一步生理生化研究奠定了基础。

大量研究发现,高浓度的营养液会抑制水培植物的生长发育^[24-25]。王瑞等^[18]发现,水培菠菜 (*Spinacia oleracea*) 在 1/8 倍浓度的营养液处理下硝酸盐显著较低,在 1/2 浓度的园试配方中产量最高。别之龙等^[11]发现,1/2 浓度的营养液浓度处理下生菜地上部和根的鲜质量、叶长和叶宽最大,而 2 倍浓度处理下上述指标最小。本研究发现,与很多水培植物表现一致,欧洲鹅耳枥水培苗在低浓

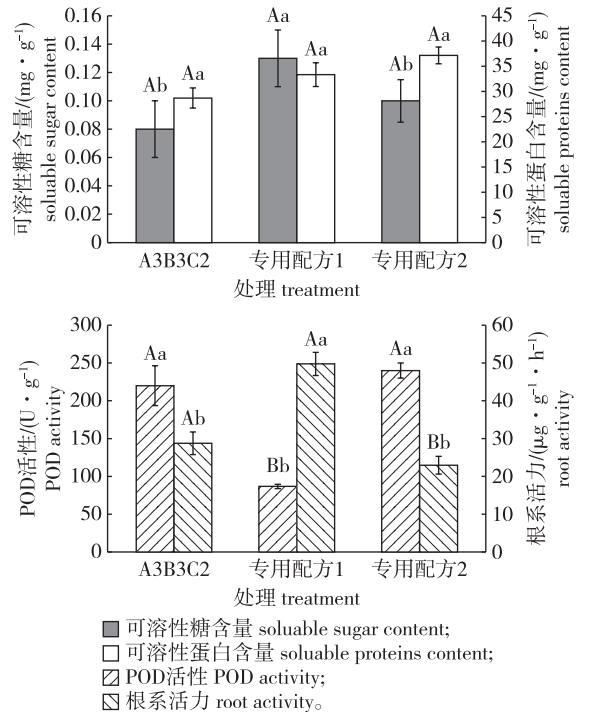


图 2 不同营养液对欧洲鹅耳枥水培苗生理指标的影响
Fig.2 Effects of different nutrient solutions on physiological indexes of hydroponic seedling of *C. betulus*

度(1/4 浓度)的营养液中生长状况最好,存活率、叶片数、平均根数、平均二级根数、根鲜质量较其他浓度都为最高,而在高浓度中生长状况不佳。这可能是由于高浓度营养液的高电导率(EC)值会导致植物根系周围出现渗透胁迫,加速了细胞膜受到伤害,降低了根系活力,最终抑制了植物的生长发育^[25-27],这与本试验中生理指标根系活力的结论一致。水培试验的检测指标分为形态指标与生理指标两类,形态指标能较直接地反映水培苗的生长状态,而生理指标是植物体内物质代谢、细胞结构,以及各种保护酶系统抗逆境系统的体现^[28],它的数值更为精确、有针对性。因此,将形态指标与生理指标相结合,在观察表相的同时监测其生理变化,才能对水培植物在不同营养液中的生长发育做出较为准确的评价。本研究综合各形态及生理指标,认为 1/4 浓度是适合欧洲鹅耳枥水培苗的常用营养液浓度。

营养液的 pH 影响植物对营养元素的吸收,低 pH 有利于阴离子的吸收,高 pH 有利于阳离子的吸收。前人研究发现,水培植物营养液的 pH 大多为 6.0~6.5^[29-31],这与本研究结果不完全一致。张仲新等^[29]研究发现,含羞草(*Mimosa pudica*) 在 pH 为 6.0 的营养液中其鲜质量、株高、冠幅、叶片数和侧枝数等形态指标及叶绿素、丙二醛等生理指标均优于其他 pH 处理。廖静^[30]研究发现,广东万年青(*Aglaonema modestum*) 最适合的营养液 pH 为 6.5,鹅掌柴(*Schefflera octophylla*) 最适合的营养液 pH 为 6.3,吊竹梅(*Tradescantia zebrina*) 最适合的营养液 pH 为 6.3。翁忙玲等^[31]发现,在营养液 pH 6.0 条件下,山葵(*Wasabi japonica* Matsum) 平均根茎鲜质量最高,且叶绿素含量和净光合速率显著高于其他偏酸或偏碱的处理。本研究结果表明,欧洲鹅耳枥水培苗在 pH 7.5 的营养液中,存活率、平均二级根数、根鲜质量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量较其他 pH 条件下高,POD 活力较其他 pH 条件下低。对中国石竹(*Dianthus chinensis*) 的水培研究发现,其在偏碱性的营养液中生长最佳^[32],本研究中欧洲鹅耳枥水培苗在偏碱性的水生环境下形态指标与生理指标都较高,这可能与欧洲鹅耳枥有一定的耐盐性有关^[4],其生理机制还有待进一步研究^[33]。

参考文献 (reference):

[1] PAULA M. The woody plant manual [M]. Washington D C: USDA Forest Service, 2008: 328-332.

[2] CIECKIEWICZ E, ANGENOT L, GRAS T, et al. Potential anticancer activity of young *Carpinus betulus* leaves [J]. Phytomedicine, 2012, 19 (3/4): 278-283. DOI: 10.1016/j.phymed.2011.09.072.

[3] CUINICA L G, ABREU I, ESTEVES DA SILVA J. Effect of air pollutant NO₂ on *Betula pendula*, *Ostrya carpinifolia* and *Carpinus betulus* pollen fertility and human allergenicity [J]. Environ Pollut, 2014, 186: 50 - 55. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.12.001.

[4] ZHOU Q, ZHU Z L, SHI M, et al. Growth and physicochemical changes of *Carpinus betulus* L. influenced by salinity treatments [J]. Forests, 2018, 9 (6): 354. DOI: 10.3390/f9060354.

[5] SHENG Q Q, ZHU Z L. Photosynthetic capacity, stomatal behavior and chloroplast ultrastructure in leaves of the endangered plant *Carpinus putoensis* W.C.Cheng during gaseous NO₂ exposure and after recovery [J]. Forests, 2018, 9 (9): 561. DOI: 10.3390/f9090561.

[6] METZGER F T. *Carpinus caroliniana* Walt [M]//BURNS R M, HONKALA B H. Silvics of North America (Volume 2): Hardwoods. Washington D.C: USDA Forest Service, 1990: 179-185.

[7] MAYNARD B K, BASSUK N L. Effects of stock plant etiolation, shading, banding, and shoot development on histology and cutting propagation of *Carpinus betulus* L. 'Fastigiata' [J]. Jashes, 1996, 121 (5): 853-860. DOI: 10.21273/jashes.121.5.853.

[8] MAYNARD B K, BASSUK N L. Stock plant etiolation and stem banding effect on the auxin dose-response of rooting in stem cuttings of *Carpinus betulus* L. 'Fastigiata' [J]. Plant Growth Regul, 1991, 10 (4): 305-311. DOI: 10.1007/BF00024590.

[9] 王华芳. 水培花卉 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002. WANG H F. Hydroponic culture of flowers [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2002.

[10] 赵九洲, 陈洁敏, 陈松笔, 等. 无土基质与营养液 EC 值对切花菊生长发育的影响 [J]. 园艺学报, 1999, 26 (5): 327-330. ZHAO J Z, CHEN J M, CHEN S B, et al. Effects of growing medium and nutrient solution electrical conductivity (EC) on the growth and development of cut chrysanthemum [J]. Acta Horti Sin, 1999, 26 (5): 327-330. DOI: 10.3321/j.issn:0513-353X.1999.05.010.

[11] 别之龙, 徐加林, 杨小峰. 营养液浓度对水培生菜生长和硝酸盐积累的影响 [J]. 农业工程学报, 2005, 21 (S2): 109-112. BIE Z L, XU J L, YANG X F. Effects of different nutrient solution concentrations on the growth and nitrate accumulation of hydroponic lettuce [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2005, 21 (S2): 109-112.

[12] 祝遵峻, 火艳. 欧洲鹅耳枥水培专用营养液: 中国, 201510102354.1 [P]. 2017-11-14. ZHU Z L, HUO Y. Special nutrient solution for water culture of *Carpinus*: China, 201510102354.1 [P]. 2017-11-14.

[13] 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, 1999. LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.

[14] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学试验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. ZHANG Z L, ZHAI W Q. Experimental guidance of plant physiology [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003.

[15] 郑炳松. 现代植物生理生化技术研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2006. ZHENG B S. Research on modern plant physiological and biochemical technology [M]. Beijing: China Meteorological

- Press, 2006.
- [16] 张鸽香,周丽琴.水杨酸对水培风信子生长及开花的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(5):20-24. ZHANG G X, ZHOU L Q. Effects of SA on the growth and flowering of hydroponics *Hyacinthus orientalis* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2013, 37(5): 20-24. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2013.05.004.
 - [17] 许业洲,杜超群,许秀环,等.湿地松针叶束水培无性系生长特性遗传分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(5):25-30. XU Y Z, DU C Q, XU X H, et al. Growth character heritability studies of water culture clones propagated from needle fascicles of *Pinus elliottii* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2013, 37(5): 25-30. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2013.05.005.
 - [18] 王瑞,胡笑涛,王文娥,等.张菠菜水培不同营养液浓度的产量、品质、元素利用效率主成分分析研究[J].华北农学报,2016,31(S):206-212. WANG R, HU X T, WANG W E, et al. Different concentrations of nutrient solution based on principal component analysis comprehensive evaluation of hydroponic spinach [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(S): 206-212.
 - [19] 丁文雅,邬小撑,刘敏娜,等.不同营养液配方对雾培生菜生物量和营养品质的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2012,38(2):175-184. DING W Y, WU X C, LIU M N, et al. Effects of different hydroponic nutrient solutions on biomass production and nutritional quality of aeroponically grown lettuce [J]. J Zhejiang Univ (Agric Life Sci), 2012, 38(2): 175-184.
 - [20] 马太和.无土栽培[M].北京:北京出版社,1980. MA T H. Soilless culture [M]. Beijing: Beijing Press, 1980.
 - [21] 安娜,须晖,孙周平,等.雾培番茄不同营养液配方的生产效果比较[J].沈阳农业大学学报,2006,37(3):495-497. AN N, XU H, SUN Z P, et al. Effects of different nutrient solutions on the tomato plant with areoponics culture [J]. J Shenyang Agric Univ, 2006, 37(3): 495-497. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1700.2006.03.057.
 - [22] 石磊,代红军.不同浓度营养液处理对长寿花生长及形态指标的影响[J].北方园艺,2013(22):67-70. SHI L, DAI H J. Effect of different nutritious solution on growth indicators and morphological index of *Kalanchoe blossfeldiana* [J]. North Hortic, 2013(22): 67-70.
 - [23] SEVIL KILINC S, ERTAN E, SEFEROGLU S. Effects of different nutrient solution formulations on morphological and biochemical characteristics of nursery fig trees grown in substrate culture [J]. Sci Hortic, 2007, 113(1): 20-27. DOI: 10.1016/j.scienta.2007.01.032.
 - [24] SAVVAS D, KARAGIANNI V, KOTSIRAS A, et al. Interactions between ammonium and pH of the nutrient solution supplied to Gerbera (*Gerbera jamesonii*) grown in pumice [J]. Plant Soil, 2003, 254(2): 393-402. DOI: 10.1023/A:1025595201676.
 - [25] 卢文晋.枸杞水培根原机诱导基理研究[D].西宁:青海大学,2014. LU W J. Lycium chinense water bacon original machine induced research base [D]. Xining: Qinghai University, 2014.
 - [26] 罗盼,周兰英,高宏梅,等.不同营养液水培对蟹爪兰的生长影响[J].北方园艺,2011(16):86-88. LUO P, ZHOU L Y, GAO H M, et al. Effects of different nutrient solution on the growth of *Zygocactus truncatus* with water culture [J]. North Hortic, 2011(16): 86-88.
 - [27] 季延海,武占会,于平彬,等.不同营养液浓度对水培韭菜生长适应性的影响[J].中国蔬菜,2017(11):53-56. JI Y H, WU Z H, YU P B, et al. Effect of nutrient solution with different concentration on growing adaptability of Chinese chive under water culture condition [J]. China Veg, 2017(11): 53-56.
 - [28] 刘丹,毕晓露,郭腾,等.广东万年青在北方地区温室环境下水培营养液配方筛选[J].新疆农业科学,2015,52(4):667-674. LIU D, BI X L, GUO T, et al. Screening of nutrient solution formula of *Aglaonema modestum* in the greenhouse environment in northeastern China [J]. Xinjiang Agric Sci, 2015, 52(4): 667-674. DOI: 10.6048/j.issn.1001-4330.2015.04.013.
 - [29] 张仲新,方正,李英丽.不同营养液水培对含羞草生长发育的影响[J].园艺学报,2007,34(4):1037-1040. ZHANG Z X, FANG Z, LI Y L. Effects of different nutrient solutions on the growth and development of *Mimosa pudica* in hydroponics [J]. Acta Hortic Sin, 2007, 34(4): 1037-1040. DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2007.04.042.
 - [30] 廖静.三种观赏植物水培机制与技术研究[D].雅安:四川农业大学,2006. LIAO J. Study on hydroponics theory and technology of three ornamentals [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2006.
 - [31] 翁忙玲,吴震,李谦盛,等.营养液浓度及pH值对山葵生长及光合速率的影响[J].园艺学报,2004,31(1):101-102. WENG M L, WU Z, LI Q S, et al. Effects of strength and pH of nutrient solution on the growth and net photosynthetic rate of wasabi (*Wasabi japonica* Matsum.) [J]. Acta Hortic Sin, 2004, 31(1): 101-102. DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2004.01.027.
 - [32] 陈发棣,房伟民,余真霞,等.中国石竹无土栽培初步研究[J].上海农业学报,1999,15(2):87-89. CHEN F D, FANG W M, YU Z X, et al. Preliminary study on soilless culture of *Dianthus chinensis* [J]. Acta Agricul Turae Shanghai, 1999, 15(2): 87-89.
 - [33] 宋立奕,方升佐.水培青檀幼苗对NaCl胁迫的生理响应[J].南京林业大学学报(自然科学版),2006,30(2):94-98. SONG L Y, FANG S Z. Physiological responses of *Pteroceltis tatarinowii* seedlings under hydroponic culture to NaCl stress [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2006, 30(2): 94-98. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2006.02.023.

(责任编辑 郑琰琰)