

丹参无土育苗营养液筛选与优化研究

王 凯¹, 谷雨琛¹, 盛业龙², 沈夕坤³, 韩 赞³, 宿树兰¹,
王圆圆¹, 惠西珂¹, 谷 巍^{1*}, 巢建国^{1*}

(1. 南京中医药大学药学院, 江苏 南京 210023; 2. 常州市孟河双峰中草药科技有限公司,
江苏 常州 213000; 3. 南京中医药大学附属苏州市中医医院, 江苏 苏州 215000)

摘 要: 为提供丹参工厂化育苗技术支持, 筛选丹参无土育苗营养液最优配方, 试验通过 $L_9(3^4)$ 正交试验选择具有代表性的营养液配方组合 (I ~ IX) 对丹参幼苗进行处理, 纯水处理为对照组 (CK), 以育成丹参幼苗的农艺性状、生理生化指标及综合得分情况作为判断标准, 同时分析营养液配方组合中的优质配方和营养液正交结果的最优组合。结果表明, 施用组别 I 的营养液, 丹参幼苗的地上部分鲜重及干重、株高、可溶性糖含量、根系活力均为较高值, 施用组别 VI 的营养液, 丹参幼苗的地下部分鲜重及干重、根粗、类胡萝卜素均为较高值; 综合评分显示, 组别 I 具有最高得分, 其次是组别 VI, 综合得分正交结果显示最优营养液水平组合为 KNO_3 810 mg/L : CaCl_2 295 mg/L : $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 208 mg/L : $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 493 mg/L。综上, 适合丹参幼苗生长的优质营养液配方组合为组别 I (KNO_3 810 mg/L : CaCl_2 948 mg/L : $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 208 mg/L : $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 493 mg/L) 和组别 VI (KNO_3 607 mg/L : CaCl_2 295 mg/L : $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 208 mg/L : $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 246 mg/L)。适合丹参幼苗生长的最优营养液水平组合为 KNO_3 810 mg/L : CaCl_2 295 mg/L : $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 208 mg/L : $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 493 mg/L。

关键词: 丹参无土育苗; 营养液; 正交试验; 综合评价

对于需要进行育苗移栽的药材而言, 种苗的优劣关系着最终形成药材的质量和产量^[1]。无土育苗技术具有幼苗生长周期短, 根系发育好, 幼苗健壮, 均一, 移栽后缓苗时间短, 成活率高等优点。并且无土育苗便于科学化, 规范化管理, 适用于工厂化大规模生产。而无土育苗中最关键的环节就是优良营养液的选择。丹参的繁殖方式多样, 而育苗移栽方式因在质量和产量以及实际生产过程中具有一定的优势^[2], 在各地丹参种植上被广泛应用。因此, 研究丹参 (*Salvia miltiorrhiza*) 的无土育苗技术, 选择一种优良的营养液配方, 对大规模生产优良的丹参种苗具有重要意义。

关于育苗营养液, 无论哪一种都应包含植物必须的营养元素以及合适的 EC 值和 pH 值, 目前已有的配方大多是 Hoagland、日本园氏、山崎配方以及在其基础上进行改良的各种营养液^[3]。袁艺等^[4]研究表明, 采用山崎配方对辣椒进行漂浮育苗, 茎粗、株高、生物量及生长速率都较优, 并对山崎配方进行优化, 发现 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的比例为 100 : 9 时, 对培育壮苗有利。吴丽君等^[5]研究表明, 采用荷兰配方对番茄进行育苗, 在各指标的综合分析上表现最好。杨少辉等^[6]研究表明, 在对蝴蝶兰幼苗的水培中, 自制营养液 IV 效果最好, 其大量元素配方为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 354 mg/L + KNO_3 177 mg/L + KH_2PO_4 57.5 mg/L + $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 185 mg/L。李玉祥等^[7]研究表明, 常规粳稻武运粳 24 号育苗营养液最适为 2 倍的原液浓度, 杂交籼稻 6 两优 9368 最适为 2 ~ 4 倍原液浓度。丰锋等^[8]研究表明, 对香蕉试管苗进行无土育苗, 较利的营养液配方为 KNO_3 950 mg/L + NH_4NO_3 412 mg/L + CaCl_2 332 mg/L + KH_2PO_4 340 mg/L。王磊等^[9]的研究表明, 对于基质栽培的组培苗, 定期根灌 1.2 倍铁盐含量、0.5 倍浓度的改良霍格兰营

收稿日期: 2019-09-07; 录用日期: 2019-10-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (81673533); 江苏省中药资源产业化过程协同中心项目 (ZDXM-3-24); 2018 年中医药公共卫生服务补助专项“全国中药资源普查项目”(财社[2019]43号); 苏州市农业科技创新项目 (2020); 2020 年江苏省研究生科研创新计划 (KYCX20_1590)。

作者简介: 王凯 (1996-), 男, 河南省新乡市人, 硕士, 研究方向为中药学, E-mail: 770422169@qq.com。

通讯作者: 谷巍, E-mail: guwei9926@126.com; 巢建国, E-mail: jgchao1016@163.com。

养液,能使百子莲呈现最佳的生长状态。万国娜^[10]的研究表明,采用配方大量元素为Ca(NO₃)₂ 707 mg/L、KNO₃ 140 mg/L、NH₄NO₃ 134 mg/L、KH₂PO₄ 169 mg/L、K₂SO₄ 120 mg/L、MgSO₄ 243 mg/L,微量元素为[−CH₂N(CH₂COONa)CH₂COO]₂Fe 30 mg/L、H₃BO₃ 2.86 mg/L、MnSO₄ 2.13 mg/L、ZnSO₄ 0.22 mg/L、CuSO₄ 0.08 mg/L、(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 0.02 mg/L的营养液,能使漂浮育苗的大白菜呈现良好长势。龚记熠等^[11]研究表明,1倍的霍格兰营养液在绥阳小米椒和紫美人辣椒漂浮育苗中使用较为合适。许雪等^[12]研究表明,阿农配方和霍格兰使津优35黄瓜幼苗根系活力强,幼苗健壮。钱宇等^[13]的研究表明,营养液初始氮浓度调节为150~200 mg/kg有利于皖南烟区烟苗的生长发育。廖璐婧等^[14]研究表明,选择磷浓度为0.04 g/L的改良霍格兰营养液能使杜仲苗有良好的生长状态。优良的种苗需要先进的育苗技术,近年来,关于丹参育苗的研究大多仍处在对传统土壤育苗方式上的细化研究^[15-16],而关于丹参无土育苗的营养液技术研究鲜有报道。因此本试验通过对营养液进行正交设计,并以其所育成的丹参幼苗农艺性状和生理生化指标作为判断依据,进行直观分析和综合评价,筛选出适合丹参无土育苗的优良营养液配方,从而为工厂化生产优质的丹参种苗提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择山东产的大小均一、优质无病虫害的丹参 *Salvia miltiorrhiza* Bunge 种子,且经南京中医药大学巢建国教授鉴定并确认。KNO₃、CaCl₂、MgSO₄·7H₂O、NH₄H₂PO₄、Na₂-EDTA、H₃BO₃、无水 MnSO₄、FeSO₄·7H₂O、CuSO₄·5H₂O、ZnSO₄、(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O、纯水均为AR级别,通用型商品基质。

1.2 试验方法

该试验于2019年3~6月在江苏省常州市孟河双峰中草药公司育种基地大棚中进行,采用正交设计,将丹参种子采用人工播种器按照随机区组设计方法播于以2~5 mm 蛭石为固定基质的162孔白色泡沫穴盘(34 cm×66 cm×5.3 cm)中,喷施纯水至出苗结束,进行间苗,每孔一株。

缓苗2 d后,于每周三8:00~9:00分别

喷施营养液,每个处理对应一盘,每次1 500 mL,整个幼苗生长期采用相同的管理措施,若天气炎热,水分蒸发快,则与喷施营养液间隔1 d后的9:00前喷施纯水。2019年5月21日干旱胁迫(不浇水)3 d后育苗结束,将每个处理组采用五点取样法进行取样,每次每组取样5株,3次重复取样。分析得到最优营养液配方后进行初步生产实践验证,采用半自动播种器将丹参种子播于装有通用型商品基质的162孔白色泡沫穴盘(34 cm×66 cm×5.3 cm)中,喷施清水至基本全部出苗后,一组喷施清水,一组喷施最优营养液。

营养液母液配制为A液KNO₃、CaCl₂,B液NH₄H₂PO₄、MgSO₄·7H₂O,C液为微量元素,各浓缩100倍,用时稀释混合均匀。具体因素水平及配方方案见表1、表2、表3。

表1 营养液因素水平设计 (mg/L)

KNO ₃ (a)	CaCl ₂ (b)	NH ₄ H ₂ PO ₄ (c)	MgSO ₄ ·7H ₂ O (d)
810(1)	945(1)	208(1)	493(1)
607(2)	658(2)	140(2)	246(2)
200(3)	295(3)	90(3)	185(3)

注:括号中的a、b、c、d分别代表KNO₃、CaCl₂、NH₄H₂PO₄、MgSO₄·7H₂O;1、2、3分别代表a、b、c、d的第一水平、第二水平和第三水平。表3同。

表2 微量元素通用表 (mg/L)

化合物名称(分子式)	浓度
FeSO ₄ ·7H ₂ O	20
Na ₂ -EDTA	37.5
H ₃ BO ₃	2.86
无水 MnSO ₄	1.44
ZnSO ₄	0.22
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0.02

1.3 测定指标及方法

直观表现:进行拍照。

生长指标:按照每个处理随机采挖5株完整的丹参幼苗,用清水将残留的基质冲洗干净,用直尺和游标卡尺测量其株高、根长、茎粗、根粗,用天平测其地上及地下部分鲜重,之后于105℃杀青30 min,在60℃下烘至恒重,测定地上及地下部分干重。

表 3 丹参幼苗正交试验方案

组别	KNO ₃ (a)	CaCl ₂ (b)	NH ₄ H ₂ PO ₄ (c) (mg/L)	MgSO ₄ · 7H ₂ O (d)	EC 值 (mS/cm)	pH 值	N:P:K:Ca:Mg:S
I	810 (1)	945 (1)	208 (1)	493 (1)	2.77	5.73	6:1:5:6:1:1
II	810 (1)	658 (2)	140 (2)	246 (2)	2.20	5.92	9:1:8:6:1:1
III	810 (1)	295 (3)	90 (3)	185 (3)	1.58	6.17	13:1:12:9:1:1
IV	607 (2)	945 (1)	140 (2)	185 (3)	2.39	5.74	9:1:8:1:1:1
V	607 (2)	658 (2)	90 (3)	493 (1)	2.07	5.87	10:1:9:9:3:3
VI	607 (2)	295 (3)	208 (1)	246 (2)	1.36	6.20	8:2:6:3:1:1
VII	200 (3)	945 (1)	90 (3)	246 (2)	2.08	5.72	4:1:3:13:2:2
VIII	200 (3)	658 (2)	208 (1)	185 (3)	1.51	5.95	5:2:3:8:1:1
IX	200 (3)	295 (3)	140 (2)	493 (1)	1.07	6.13	3:1:2:3:2:2
CK	0	0	0	0	0.04	6.91	0:0:0:0:0:0

注: CK 为纯水处理组, 正交表参照 L₉ (3⁴) 无空列正交表。

生理生化指标测定: 取样时采取丹参幼苗的根系和去除叶柄的健康成熟叶片, 锡箔纸包好, 写上标记, 根系活力当天即测, 其余样品于液氮罐短暂存放, 随后保存于 -20℃ 冰箱待用。可溶性蛋白含量^[17]采用考马斯亮蓝法测定, 可溶性糖含量采用苯酚法测定, 根系活力采用 TTC 法测定, MDA (丙二醛) 含量采用硫代巴比妥酸法测定^[18], 叶绿素含量^[19]采用乙醇法测定。

1.4 统计分析

运用 Excel 2019 对试验数据进行整理, 并结合 SPSS 19.0 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 营养液配方组合对丹参幼苗生长指标的影响

表 4 表明, 地上部分鲜重及干重、株高的

最大值均为组别 I, 分别为 (0.43 ± 0.239) g、(0.07 ± 0.032) g、(4.68 ± 1.828) cm, 除地上部分干重为组别 IV, 其次为组别 V; 根粗及地下部分干重最大值均为组别 III, 分别为 (2.37 ± 0.429) mm、(0.03 ± 0.010) g, 其次为组别 VI; 地下部分鲜重的最大值 (0.15 ± 0.071) g 为组别 VI, 其次为组别 III; 茎粗的最大值 (2.96 ± 0.776) mm 为组别 IV, 其次为组别 III; 两者并不具有显著性差异, 但均显著高于对照组 (CK)。组别 VII 农艺性状最差, 出现明显病态, 表明其在干旱胁迫下自我调控能力较弱, 抗性较低, 其余处理介于两者之间。综合相应农艺性状前两组的出现频次及幼苗直观表现可以看出, I、VI、III 组所育的丹参幼苗较好。

表 4 不同营养液配方组合下丹参幼苗的农艺性状

指标	I	II	III	IV	V
地上部分鲜重 (g)	0.43 ± 0.239a	0.23 ± 0.154bc	0.29 ± 0.199ab	0.28 ± 0.199ab	0.33 ± 0.263ab
地下部分鲜重 (g)	0.10 ± 0.073abc	0.09 ± 0.059bc	0.13 ± 0.086ab	0.08 ± 0.056bcd	0.10 ± 0.075bc
株高 (cm)	4.68 ± 1.828a	3.46 ± 1.055bc	3.91 ± 1.052ab	3.79 ± 0.870ab	4.11 ± 1.447ab
根长 (cm)	7.72 ± 2.235	7.13 ± 0.868	8.37 ± 2.100	7.32 ± 2.545	7.96 ± 1.939
茎粗 (mm)	2.48 ± 0.415a	2.63 ± 0.787a	2.86 ± 0.612a	2.96 ± 0.776a	2.08 ± 0.791b
根粗 (mm)	1.88 ± 0.662c	2.12 ± 0.495abc	2.37 ± 0.429a	1.97 ± 0.499bc	1.45 ± 0.553d
地上部分干重 (g)	0.07 ± 0.032a	0.04 ± 0.014c	0.05 ± 0.019ab	0.06 ± 0.024ab	0.05 ± 0.025ab
地下部分干重 (g)	0.02 ± 0.009ab	0.02 ± 0.006bc	0.03 ± 0.010a	0.02 ± 0.010ab	0.02 ± 0.008ab
指标	VI	VII	VIII	IX	CK
地上部分鲜重 (g)	0.27 ± 0.169ab	0.12 ± 0.056d	0.15 ± 0.075cd	0.30 ± 0.105ab	0.09 ± 0.033d
地下部分鲜重 (g)	0.15 ± 0.071a	0.10 ± 0.048abc	0.07 ± 0.035cd	0.13 ± 0.065ab	0.05 ± 0.019d
株高 (cm)	3.76 ± 1.110abc	3.28 ± 1.103bc	3.03 ± 0.601c	3.99 ± 1.185ab	1.95 ± 0.464d
根长 (cm)	7.01 ± 2.247	7.19 ± 2.352	7.37 ± 1.792	8.39 ± 2.583	8.49 ± 1.895
茎粗 (mm)	2.57 ± 0.844a	1.8 ± 0.473b	2.01 ± 0.417b	2.51 ± 0.704a	1.26 ± 0.346c
根粗 (mm)	2.28 ± 0.647ab	1.82 ± 0.613cd	1.75 ± 0.39cd	1.96 ± 0.483bc	1.46 ± 0.289d
地上部分干重 (g)	0.05 ± 0.027bc	0.02 ± 0.010e	0.03 ± 0.011d	0.04 ± 0.011c	0.02 ± 0.006e
地下部分干重 (g)	0.03 ± 0.014ab	0.01 ± 0.006c	0.01 ± 0.007c	0.02 ± 0.011b	0.01 ± 0.006c

注: 显著性水平 $\alpha=0.05$, 无相同小写字母代表差异显著。表 5 同。

2.2 营养液配方组合对丹参幼苗生理生化指标的影响

从表 5 可以看出, 对照组 (CK) 在可溶性蛋白、MDA、可溶性糖含量上均为最大值, 类胡萝卜素含量位居第 2, 根系活力除 VII 组外最低, 这可能与对照组面临营养缺乏而生长缓慢以及面对干旱胁迫的一种生理性反应有关。9 种营养液配方组合在可溶性蛋白含量上最高为 IX 组 (3.81 ± 0.145) mg/g, 显著 ($P<0.05$) 高于最低值 (V 组), 为其 1.45 倍; 在 MDA 含量上最低为 IV

组 (0.01 ± 0.005) $\mu\text{mol/g}$, 显著 ($P<0.05$) 低于 II、I、III、VI 组; 在可溶性糖含量、根系活力上最高均为 I 组 (62.38 ± 12.663) mg/g、(111.44 ± 6.168) $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 均显著 ($P<0.05$) 高于最低值 (III 组和 VII 组), 分别为其 1.79、4.31 倍; 在类胡萝卜素含量上最高为 VI 组 (0.15 ± 0.043) mg/g, 显著 ($P<0.05$) 高于最低值 (IV 组), 为其 2.14 倍。从以上结果分析中可以看出, 在生长指标优质的基础上, 9 组营养液配方组合中较优的为组别 I、VI。

表 5 不同营养液配方组合下丹参幼苗的生理生化指标

指标	I	II	III	IV	V
可溶蛋白含量 (mg/g)	$2.71 \pm 0.237\text{d}$	$2.88 \pm 0.508\text{cd}$	$2.85 \pm 0.248\text{cd}$	$2.84 \pm 0.124\text{cd}$	$2.62 \pm 0.711\text{d}$
MDA 含量 ($\mu\text{mol/g}$)	$0.02 \pm 0.003\text{abc}$	$0.02 \pm 0.002\text{ab}$	$0.02 \pm 0.001\text{abc}$	$0.01 \pm 0.005\text{d}$	$0.01 \pm 0.001\text{cd}$
可溶性糖含量 (mg/g)	$62.38 \pm 12.663\text{a}$	$58.05 \pm 2.387\text{ab}$	$34.78 \pm 2.552\text{d}$	$43.99 \pm 4.008\text{cd}$	$49.56 \pm 6.826\text{bc}$
根系活力 [$\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$]	$111.44 \pm 6.168\text{a}$	$73.24 \pm 13.136\text{c}$	$91.23 \pm 13.667\text{b}$	$103.03 \pm 6.429\text{ab}$	$58.57 \pm 10.06\text{cd}$
总叶绿素含量 (mg/g)	0.78 ± 0.179	0.57 ± 0.116	0.71 ± 0.163	0.60 ± 0.114	0.53 ± 0.099
叶绿素 a 含量 (mg/g)	0.53 ± 0.13	0.37 ± 0.085	0.48 ± 0.119	0.40 ± 0.085	0.33 ± 0.072
叶绿素 b 含量 (mg/g)	0.25 ± 0.049	0.20 ± 0.031	0.24 ± 0.045	0.21 ± 0.03	0.20 ± 0.028
类胡萝卜素含量 (mg/g)	$0.10 \pm 0.028\text{ab}$	$0.07 \pm 0.03\text{b}$	$0.11 \pm 0.046\text{ab}$	$0.07 \pm 0.017\text{b}$	$0.08 \pm 0.023\text{b}$

指标	VI	VII	VIII	IX	CK
可溶蛋白含量 (mg/g)	$3.23 \pm 0.163\text{abc}$	$3.69 \pm 0.66\text{ab}$	$3.22 \pm 0.309\text{bcd}$	$3.81 \pm 0.145\text{ab}$	$4.19 \pm 0.512\text{a}$
MDA 含量 ($\mu\text{mol/g}$)	$0.01 \pm 0.001\text{abc}$	$0.01 \pm 0.003\text{bcd}$	$0.01 \pm 0.004\text{bcd}$	$0.01 \pm 0.001\text{abcd}$	$0.02 \pm 0.008\text{a}$
可溶性糖含量 (mg/g)	$49.52 \pm 5.984\text{bc}$	$38.33 \pm 4.371\text{d}$	$50.98 \pm 6.827\text{bc}$	$41.96 \pm 6.282\text{cd}$	$63.49 \pm 4.292\text{a}$
根系活力 [$\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$]	$66.45 \pm 16.963\text{c}$	$25.84 \pm 3.848\text{e}$	$47.74 \pm 1.866\text{d}$	$58.63 \pm 5.859\text{cd}$	$46.44 \pm 4.5\text{d}$
总叶绿素含量 (mg/g)	0.81 ± 0.162	0.58 ± 0.083	0.54 ± 0.063	0.70 ± 0.172	0.72 ± 0.074
叶绿素 a 含量 (mg/g)	0.54 ± 0.126	0.36 ± 0.051	0.34 ± 0.056	0.47 ± 0.137	0.48 ± 0.052
叶绿素 b 含量 (mg/g)	0.27 ± 0.036	0.22 ± 0.033	0.20 ± 0.009	0.23 ± 0.035	0.24 ± 0.022
类胡萝卜素含量 (mg/g)	$0.15 \pm 0.043\text{a}$	$0.10 \pm 0.011\text{ab}$	$0.08 \pm 0.024\text{b}$	$0.11 \pm 0.025\text{ab}$	$0.14 \pm 0.019\text{a}$

2.3 基于多指标综合评分法筛选最优营养液配方

以农艺性状和生理生化指标归一化 (试验指标值 / 试验指标最大值) 后的加权评分作为综合评分法的最终指标, 然后分别分析营养液配方组合的最优结果和营养液正交试验的最优结果。本次试验权重的计算采用客观赋权法 (熵权法)。权重系数具体为叶绿素 a 含量 0.09, 可溶性蛋白含量、总叶绿素含量、叶绿素 b 含量、根长为 0.08, MDA 含量、可溶性糖含量、类胡萝卜素含量、地下部分鲜重、茎粗、地下部分干重为 0.06, 根系活力、地上

部分鲜重、株高、根粗、地上部分干重为 0.05, 其中 MDA 含量为负向标, 丹参幼苗的综合得分越高越好。

2.3.1 营养液配方组合对丹参幼苗综合得分的影响

从表 6 可以看出, 9 种营养液配方组合按综合得分大小依次为 I > VI > III > IX > IV > V > II > VII > VIII, 其中 I、VI、III 组极显著 ($P<0.01$) 高于 VII、VIII 组, I、VI 组显著 ($P<0.05$) 高于 V、II、VII、VIII 组。因此在试验的 9 组营养液配方中, 较为优质的为 I、VI 组, 同生长和生理生化指标一致。

表6 不同营养液配方组合下丹参幼苗的综合得分

组别	I	II	III	IV	V
综合得分	0.661 ± 0.022aA	0.525 ± 0.067bcAB	0.628 ± 0.076abA	0.580 ± 0.058abAB	0.527 ± 0.077bcAB
组别	VI	VII	VIII	IX	
综合得分	0.649 ± 0.081aA	0.475 ± 0.022cB	0.470 ± 0.056cB	0.599 ± 0.026abAB	

注: 不同小写字母 ($P < 0.05$)、不同大写字母 ($P < 0.01$) 分别代表差异显著。

2.3.2 营养液配方组合综合得分的正交结果分析

从表7可以看出, 极差值R与F值显示4种因素的主次顺序依次为 $b > a > c > d$, 但方差显著性Sig显示, a因素随着水平的变化对丹参幼苗综合得分具有显著 ($P < 0.05$) 的影响, b因素随着水平的变化对丹参幼苗综合得分具有极显著 ($P < 0.01$) 的影响。表明该试验的营养液成分中, CaCl_2 对丹参幼苗的生长影响最大, 其次为 KNO_3 。

表7 丹参幼苗综合得分正交结果分析

因素	极差值R	F值	方差显著性Sig	因素主次顺序	优水平组合
a	0.090	5.849	0.011	$b > a > c > d$	1 3 11
b	0.118	9.149	0.002		
c	0.050	1.650	0.220		
d	0.046	1.550	0.239		

注: Sig代表显著性差异的值, 即P值; a、b、c、d分别代表 KNO_3 、 CaCl_2 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。

从图1可以看出, a、c因素的3个水平按得分值大小依次为 $1 > 2 > 3$, b因素的3个水平按得分值大小依次为 $3 > 1 > 2$, d因素的3个水平按得分值大小依次为 $1 > 3 > 2$ 。其中a因素1水平极显著 ($P < 0.01$) 高于3水平, b因素3水平极显著 ($P < 0.01$) 高于2水平。从以上分析可得理论上最优的营养液配方组合为 a1b3c1d1。

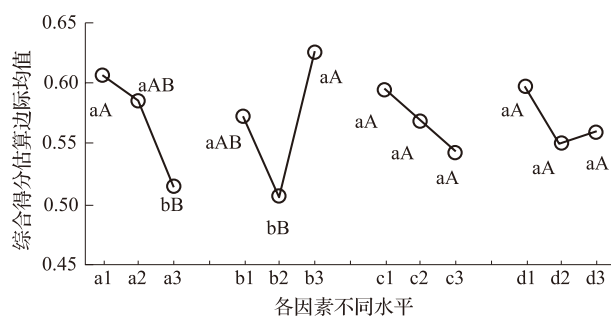


图1 各因素不同水平综合得分估算边际均值

注: 图中不同小写字母 ($P < 0.05$)、大写字母 ($P < 0.01$) 分别代表差异显著。

3 讨论

无土育苗营养液一般由大量元素和微量元素组成, 其中各元素之间有着复杂的相互作用。而植物对各元素的吸收形式有主动吸收和被动吸收, 因此外界各元素的浓度和比例对植物生长有着巨大的影响。生长指标是植物最直观的表现, 营养液中元素的变化最容易从生长指标中发现。从试验结果来看, 组别I对丹参的地上部分生长有利, 可能与其相对含N、K量比较高且丹参处于营养生长期的原因有关, 这与夏贵惠^[20]对丹参营养需求的研究一致。王渭玲等^[21]发现适当的N、P肥结合能够促进丹参的营养生长, 在K肥等量的情况下, I组优于II、III组, 这可能与合适的N、P搭配有关; 组别VI对丹参地下部分的生长有利, 可能与其相对含P量较高有关, 这与翟彩霞等^[22]的研究一致。陈晓玉等^[23]发现N、P、K对丹参产量的影响为 $N > K > P$, 且交互效应 $NP > NK > PK$, 本试验中在 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 等量的情况下, 组别VI具有合适的 KNO_3 施用量可能是其效果优异的原因。

植物生理生化指标能够显示植物内部的变化, 而这些内部成分的合成离不开外界的各种元素, N和S、P、Mg分别是蛋白质、核酸、叶绿素的组成元素之一, K是细胞主要的渗透物质之一, Ca不仅是植物生长的必需元素, 也同时作为第二信使在植物光合作用中发挥着重要作用^[24]。Cl具有调节植物渗透压、调节气孔、参与植物光合作用、促进酶的活化等功能^[25]。从试验结果来看, 组别I所育成的丹参幼苗具有较高的可溶性糖和根系活力, 这可能是因为含N、P量较高^[26-27], 也可能是在 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 等量的情况下, I组与VI组和VIII组对比, KNO_3 作为N、K的提供者, 比例均为1:1, 但I组整体N、K含量均高, 与前人^[28-29]研究一定范围内随着N、K施用量的增加, 可溶性糖含量随之增加一致。组别VI所育成的丹参幼苗类

胡萝卜素含量较高,这可能与施入一定量的Cl有关^[30],同时,在Cl含量一致时,也可能与其N、P、K含量均较高有关,这与陈义强等^[31]对烟草在每盆0~8 g N、0~12 g P₂O₅、0~12 g K₂O的范围内,随着N、P、K施用量的增加能够促进类胡萝卜素含量积累的研究结果一致。综合评分正交结果显示,本试验营养液组成中,CaCl₂对丹参幼苗的生长影响最大,其次为KNO₃,且从综合得分估算边际均值的趋势来看,CaCl₂随着浓度的上升呈现V形趋势,这表明丹参幼苗对CaCl₂的适宜浓度在本试验为295 mg/L达到或超出了一个最佳点,可能因为Ca随着初始浓度的增加抑制了丹参幼苗的生长,超出658 mg/L时,过量的Ca可能又起到了缓解胁迫的作用,这与汪雷等^[32]研究中对MDA含量的变化趋势相一致;也可能与Cl含量过高产生毒害有关。从KNO₃浓度的趋势来看,综合得分随着浓度的上升而上升,表明在本试验中丹参幼苗对KNO₃的需求并未达到峰值。

4 结论

在本试验中影响丹参幼苗生长的因素按主次分别为CaCl₂>KNO₃>NH₄H₂PO₄>MgSO₄·7H₂O。适合丹参幼苗生长的优质营养液配方组合为组别I(KNO₃ 810 mg/L:CaCl₂ 948 mg/L:NH₄H₂PO₄ 208 mg/L:MgSO₄·7H₂O 493 mg/L)、组别VI(KNO₃ 607 mg/L:CaCl₂ 295 mg/L:NH₄H₂PO₄ 208 mg/L:MgSO₄·7H₂O 246 mg/L),适合丹参幼苗生长的最佳营养液水平组合为KNO₃ 810 mg/L:CaCl₂ 295 mg/L:NH₄H₂PO₄ 208 mg/L:MgSO₄·7H₂O 493 mg/L。

参考文献:

- [1] 高娜,孙永军,张建军,等. 中药材种子种苗质量分级标准研究进展[J]. 中国中医药信息杂志, 2018, 25(4): 129-132.
- [2] 张永清. 不同繁殖方式对丹参药材产量与质量的影响[A]. 中国商品学会. 第一届全国中药商品学术大会论文集[C]. 中国商品学会: 中国商品学会, 2008, 8.
- [3] 邵兴华,熊佳文,季天委. 无土栽培常用营养液及应用综述[J]. 东北农业科学, 2018, 43(2): 40-43.
- [4] 袁艺,陶婧,汪骞,等. 辣椒漂浮育苗营养液筛选与优化研究[J]. 西南农业学报, 2017, 30(9): 2085-2090.
- [5] 吴丽君,夏西亚,王莹茜. 不同营养液对番茄幼苗生长及光合色素含量的影响[J]. 北方园艺, 2017, (3): 1-5.
- [6] 杨少辉,季静,王罡. 不同营养液对蝴蝶兰水培生长的影响[J]. 河北农业大学学报, 2008, (06): 30-33.
- [7] 李玉祥,解双喜,刘扬,等. 营养液浓度对水稻机插水培毯状秧苗素质及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 201-209.
- [8] 丰锋,谢裕华,冯雅兰,等. 香蕉无土育苗基质筛选及营养液配方优化[J]. 中国南方果树, 2016, 45(6): 56-60.
- [9] 王磊,卓丽环,李瑞发. 百子莲无土栽培营养液配方的研究[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(2): 238-242.
- [10] 万国娜. 大白菜漂浮育苗营养液筛选及育苗关键技术的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [11] 龚记熠,唐明,张习敏,等. Hoaglang 营养液对漂浮育苗辣椒的影响[J]. 分子植物育种, 2017, 15(8): 3244-3253.
- [12] 许雪,季延海,张广华,等. 不同营养液配方对黄瓜营养液育苗效果的影响[J]. 北方园艺, 2015, (11): 44-48.
- [13] 钱宇,汪文杰,伍德洋,等. 漂浮育苗条件下营养液初始氮浓度对烟苗生长及生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(19): 35-37.
- [14] 廖璐婧,张美德,张宇,等. 杜仲穴盘育苗技术研究[J]. 中药材, 2018, 41(1): 13-17.
- [15] 孟肖. 不同海拔丹参苗期生长发育的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- [16] 李连珍,刘媛媛,高致明. 育苗移栽时间对裕丹参生长发育的影响[J]. 时珍国医国药, 2014, 25(4): 952-953.
- [17] 焦洁. 考马斯亮蓝 G-250 染色法测定苜蓿中可溶性蛋白含量[J]. 农业工程技术, 2016, 36(17): 33-34.
- [18] 李合生. 植物生理生化试验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] 孙玉新,李永明,刘德辉. 锰对栽培丹参的生长和丹参酮类物质累积的影响[J]. 土壤, 2011, 43(1): 95-100.
- [20] 夏贵惠. 丹参氮磷钾需求及其与产量质量的关系初探[D]. 北京: 北京中医药大学, 2017.
- [21] 王渭玲,梁宗锁,孙群,等. 丹参高产栽培优化配方施肥技术研究[J]. 西北植物学报, 2004, (1): 130-135.
- [22] 翟彩霞,温春秀,王凯辉,等. 氮、磷、钾肥对丹参根系生长及养分含量的影响[J]. 华北农学报, 2008, (S1): 220-223.
- [23] 陈晓玉,贺超,闫滨滨,等. N、P、K 配施对丹参产量和质量的影响[J]. 中草药, 2019, 50(3): 722-730.
- [24] Bush D S. Calcium regulation in plant cells and its role in signaling[J]. Annual Review of Plant Physiology & Plant Molecular Biology, 1995, 46(1): 95-122.
- [25] 陈宇晖. 植物的氯营养与氯肥施用[J]. 湖北农学院学报, 1990, (03): 65-71, 31.
- [26] 李君. AM 真菌和施肥量对丹参生长和化学成分交互效应[D]. 保定: 河北大学, 2010.
- [27] 薛永峰. 不同氮、磷水平对丹参产量和有效成分的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- [28] 关佳莉,王刚,张梦蕊,等. 不同氮素供应水平对菘蓝生长及药材质量的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(10): 2077-2085.
- [29] 柳昱昱,高润梅,王秀丽,等. 不同钾盐对穿龙薯蓣幼苗生

- 长与部分产物合成的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 81-87.
- [30] 马旭三. 含氯肥料对万寿菊产量及叶黄素含量的影响[J]. 云南农业科技, 2016, (2): 22-24.
- [31] 陈义强, 刘国顺, 凌爱芬, 等. 氮、磷、钾肥和土壤水分对烟草烤后叶中类胡萝卜素含量的影响[J]. 植物生理学通讯, 2008, (2): 279-282.
- [32] 汪雷, 马琛, 高海立, 等. 钙对半夏生理特性及光合生理的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(04): 461-467.

Screening and optimization of nutrient solution for soilless seedling raising of *Salvia miltiorrhiza*

WANG Kai¹, GU Yu-chen¹, SHENG Ye-long², SHEN Xi-kun³, HAN Yun³, SU Shu-lan¹, WANG Yuan-yuan¹, HUI Xi-ke¹, GU Wei^{1*}, CHAO Jian-guo^{1*} (1. School of Pharmacy, Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, Nanjing Jiangsu 210023; 2. Changzhou Menghe Shuangfeng Chinese Herbal Medicine Co. Ltd, Changzhou Jiangsu 213000; 3. Suzhou TCM Hospital Affiliated to Nanjing University of Chinese Medicine, Suzhou Jiangsu 215000)

Abstract: In order to provide technical support for industrialized seedling raising of *Salvia miltiorrhiza* and screen the optimum formula of nutrient solution for soilless seedling raising of *Salvia miltiorrhiza*, the representative formula combination of nutrient solution (I ~ IX) was selected through $L_9(3^4)$ orthogonal experiment to treat *Salvia miltiorrhiza* seedlings, and pure water treatment was used as control group (CK), in order to cultivate the agronomic shape, physiology and biochemistry of *Salvia miltiorrhiza*. Indicators and comprehensive scores were used as the criteria for judging, and the optimal combination of high quality formula and orthogonal results of nutrient solution in nutrient solution formulation combination were analyzed. The results showed that the fresh weight and dry weight, plant height, soluble sugar content and root activity of the above ground part of *Salvia miltiorrhiza* seedlings were higher when the nutrient solution of group I was applied, and the fresh weight and dry weight, root diameter and carotenoids of the underground part of *Salvia miltiorrhiza* seedlings were higher when the nutrient solution of group VI was applied. The highest score was group I, followed by group VI. The orthogonal test showed that the optimal nutrient solution level combination was KNO_3 810 mg/L : CaCl_2 295 mg/L : $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 208 mg/L : $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 493 mg/L. In conclusion, the optimal nutrient solution formulation for *Salvia miltiorrhiza* seedling growth was group I (KNO_3 810 mg/L : CaCl_2 948 mg/L : $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 208 mg/L : $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 493 mg/L) and group VI (KNO_3 607 mg/L : CaCl_2 295 mg/L : $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 208 mg/L : $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 246 mg/L). The optimum nutrient solution combination for the growth of *Salvia miltiorrhiza* seedlings was KNO_3 810 mg/L : CaCl_2 295 mg/L : $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 208 mg/L : $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 493 mg/L.

Key words: soilless seedling raising of *Salvia miltiorrhiza*; nutrient solution; orthogonal test; comprehensive evaluation