

基于回归旋转分析的秦岭北坡华山松容器育苗 基质配比和施肥技术

于金鑫^{1a}, 张宏², 潘泰臣^{1a}, 邱志斌^{1a}, 高晓晓^{1a}, 张胜利^{1b, 3}

(1. 西北农林科技大学 a. 水土保持研究所; b. 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 陕西太白山国家级自然保护区管理局, 陕西 杨凌 712100;

3. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 【目的】探究容器育苗氮肥、磷肥施用量和基质配比的最佳组合。【方法】以秦岭北坡华山松天然分布区为试验地, 采用三因素二次回归通用旋转组合设计, 建立了华山松容器苗各生长指标与氮肥、磷肥施用量和基质配比的回归模型并进行分析。【结果】影响华山松苗高的因素主次为: 磷肥>氮肥>基质配比; 地径: 氮肥>磷肥>基质配比; 针叶数: 磷肥>氮肥>基质配比; 轮数: 氮肥>磷肥>基质配比; 磷肥对于氮肥有促进作用, 且在N:P为1.38时对华山松容器苗各生长指标交互作用最好; 秦岭北坡华山松最佳基质配比为土:砂:羊粪:菌根土体积比3.8:2.2:3:1, 施肥方案为: 氮肥(尿素)分3次施入, 时间分别是: 苗龄25 d、40 d、54 d, 施用量为每株苗木0.47 g; 磷肥(过磷酸钙)在配置基质时施入, 施用量为每100 kg基质3.35 kg。

【结论】得出了秦岭北坡华山松容器育苗最佳的基质配比及施肥技术, 在基质配比为土:砂:羊粪:菌根土体积比3.8:2.2:3:1, 施肥量为氮肥0.47 g/株, 磷肥每100 kg基质3.35 kg条件下华山松苗木生长情况最佳。回归通用旋转组合设计可以用于其他地区华山松容器育苗技术研究和其他种类苗木的容器育苗技术的研究, 大幅度减少试验量, 为容器育苗技术的探究提供较快捷简便的方法。

关键词: 华山松; 回归通用旋转组合设计; 容器育苗; 基质配比; 施肥

中图分类号: S723.1⁺33

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2021)01-0109-08

Study on the container seedling substrate ratio and fertilization of *Pinus armandii* on the north slope of the Qinling mountains based on regression rotation analysis

YU Jinxin^{1a}, ZHANG Hong², PAN Taichen^{1a}, QIU Zhibin^{1a}, GAO Xiaoxiao^{1a}, ZHANG Shengli^{1b,3}

(1. a. Institute of Soil and Water Conservation; b. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Taibai Mountains National Nature Reserve of Shaanxi, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: 【Objective】 In order to explore the best combination of nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer application and matrix ratio in container nursery. 【Method】 The natural distribution area of *Pinus armandii* on the northern slope of the Qinling mountains were selected as the study area. The three-factor quadratic regression universal rotating combination model were used and the regression model were established to analyze the growth index and nitrogen fertilizer, phosphorus fertilizer application rate and matrix ratio of *Pinus armandii* container seedlings. 【Result】 The seedling height of *Pinus armandii* is influenced greatly by the phosphate fertilizer, nitrogen fertilizer and container seedling substrate ratio in a sequence. The ground diameter of *Pinus armandii* is most affected by the nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and container seedling substrate ratio in a sequence. The number of needles of *Pinus armandii* is influenced greatly by the phosphate fertilizer, nitrogen fertilizer and container seedling substrate ratio in a sequence. The rounds of *Pinus armandii* is influenced largely by the nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and container seedling substrate ratio in a sequence. Phosphate fertilizer can promote nitrogen fertilizer, and the growth of *Pinus armandii* is optimum when N:P is 1.38. The optimal ratio

收稿日期: 2019-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0600504-2)。

第一作者: 于金鑫(947092757@qq.com), 硕士研究生。

通信作者: 张胜利(victory6515@sina.com), 副教授, 博士。

引文格式: 于金鑫, 张宏, 潘泰臣, 等. 基于回归旋转分析的秦岭北坡华山松容器育苗基质配比和施肥技术[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 109-116.

YU J X, ZHANG H, PAN T C, et al. Study on the container seedling substrate ratio and fertilization of *Pinus armandii* on the north slope of the Qinling mountains based on regression rotation analysis[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(1): 109-116.

of nutrient soil of *Pinus armandii* on the north slope of the Qinling mountains is soil: sand: sheep manure:mycorrhizal soil volume ratio 3.8:2.2:3:1. The fertilization scheme as follows: nitrogen fertilizer (urea) is applied in three times at the seedling age of 25 d, 40 d and 54 d, respectively, and the application amount is 0.47 g per seedling. Phosphate fertilizer (superphosphate) is applied in container seedling substrate, and the dosage is 3.35 kg per 100 kg of nutritive soil. 【Conclusion】 The optimum matrix ratio and fertilization technique for seedling in container of *Pinus armandii* on the north slope of the Qinling mountains are obtained by using the general rotating combination design of three-factor quadratic regression. Under the conditions of substrate ratio of soil: sand: sheep manure: mycorrhizal soil volume ratio 3.8:2.2:3:1, the fertilizer application rate is 0.47 g of nitrogen fertilizer per plant, and 3.35 kg of phosphate fertilizer per 100 kg of substrate, the seedling growth of *Pinus armandii* is the best. And the method can be applied to the exploration of container seedling technology in other regions and seedlings, greatly reduce the amount of testing, and provides a convenient method for the exploration of container seedlings technology.

Keywords: *Pinus armandii*; quadratic regression universal rotary design; container seedling; the ratio of the substrate; fertilization

华山松 *Pinus armandii* 生长速度快, 适应性好, 木材质量好^[1], 是我国西部地区的主要造林树种, 具有很高的经济价值^[2-3]。现阶段, 裸根苗成活率低、初期生长量小、保存率低是华山松苗木生产所面临的主要问题^[4-5]。而容器育苗可以较好地应对这一问题, 容器育苗就是采用各种容器装入配置好的营养土进行育苗的技术, 其具有成活率高、初期生长量大、保存率高等特点^[6-7], 曾进等^[8]对晚松育苗方式的研究也侧面证实了这一观点。因此培育华山松优质容器苗就变得十分必要, 而容器育苗技术的研究重点主要涉及基质配比和施肥量两个方面^[9], 前人针对这两方面也进行了较全面的研究。其中在基质配比方面, 李永峰^[10]研究得出适合华山松幼苗生长的基质是 4(草炭):3(蛭石):3(珍珠岩)或 3(树皮粉):4(秸秆):3(蛭石)。马占良^[11]研究得出适合华山松幼苗生长的基质配比为 1(草炭):1(蛭石):1(珍珠岩)。张晓梅^[12]经研究发现当基质配比为 4(黄心土):3(腐殖质土):1(腐熟基肥):1(河沙):1(木屑)时, 华山松幼苗生长情况最佳。武捷等^[13]发现基质配比体积比为 4(椰糠):1(表土):1(菜籽饼)或 4(表土):1(甘蔗灰):1(菜籽饼)时酸柚苗在生物量及矿质元素方面表现均良好。傅国林等^[14]研究发现油茶果壳作为容器育苗的轻基质具有很好的开发价值; 在容器育苗施肥方面, 伏彩娟^[15]研究发现华山松容器育苗基肥以过磷酸钙、腐熟羊粪、鸡粪及磷酸二铵为宜。袁小军等^[16]研究发现施用氮肥可以相聚促进油茶花芽伸长, 且在施肥量为 N 218.23 g/株、P 71.00 g/株、K 242.48 g/株时, 油茶生长情况最佳。张永恩^[17]研究得出华山松速生期按 N:P:K=3:2:1 进行施肥, 生长情况最佳。胡刚等^[18]得出华山松在苗龄 40 d 开始施肥为宜, 施肥比例宜为 N:P:K=3:2:2。

虽然目前以上两方面在华山松容器育苗生产

中均有相应的研究, 且均得出了最适合华山松生长的基质配比和施肥方案, 但是两者结合后对华山松幼苗生长影响的研究罕见报道。因此本试验采用二次回归通用旋转设计的方法, 将容器育苗基质配比与各种化肥施用量统一考虑, 得出最佳组合, 为培育华山松优质壮苗生产实践提供技术支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验地基本情况

秦岭北坡年平均降水量小, 降水时段较为分散^[19], 苗木不易遭受水淹灾害; 北坡年平均气温及冬季平均气温相对较高^[20], 利于华山松幼苗生长和越冬。因此选定秦岭北坡作为试验地区, 而蒿坪林区处于秦岭北麓红河谷与石头河之间林区中部, 太白山主峰北麓偏西位置, 在气候、森林植被、土壤、地形、地貌等方面具有秦岭北坡的典型特征^[21], 且有天然的华山松林分布, 综合考虑后, 试验地最终选定在蒿坪林区(107°41'E, 34°05'N), 海拔 1 300 ~ 2 800 m, 地处我国西北部暖温带, 属典型的暖温带半湿润气候, 有着明显的气候垂直带。年平均气温为 8.0 ~ 11.4℃。森林资源丰富, 森林覆盖率 81.2%, 主要土壤类型有高山草甸土、山地暗棕壤、山地沼泽土等, 植被带属于华山松林、栎林及落叶阔叶混交林带。

1.2 试验设计

试验采用三因素二次回归通用旋转设计方法, 具有试验次数少、计算简单和方便寻优等优点^[22]。根据当地黄心土化学性质测定结果(表 1)以及当地群众经验, 秦岭北坡钾肥含量满足植物需求, 而氮和磷不足^[23]。因此确定试验因素为: 氮肥施用量、磷肥施用量和育苗容器基质配比。

表 1 试验用土壤 N、P、K 的含量

Table 1 The N, P and K contents of the soil used in the test

试验因素 Experimental factor	氮含量 N content / (g·kg ⁻¹)	磷含量 P content / (mg·kg ⁻¹)	钾含量 K content / (mg·kg ⁻¹)
土壤样品 Soil samples	1.87	6.78	137.93
植物最低需求量 Minimum plant requirement	2.00	10.00	106.00

由前期试验与实际调研可以确定各因素的上、下限，其中氮肥施用量的上、下限 (Z_{21} 、 Z_{11}) 确定为 0.47% 和 0.13%，磷肥施用量的上、下限 (Z_{22} 、 Z_{12}) 确定为 3.35% 和 0.65%，基质配比的上、下限 (Z_{23} 、 Z_{13}) 确定为 38.40% 和 21.60%，各因素的零水平 (Z_{pj}) 和变化间隔 (Δ_j) 为：

$$Z_{pj} = (Z_{1j} + Z_{2j}) / 2. \quad (1)$$

$$\Delta_j = (Z_{2j} - Z_{1j}) / \gamma. \quad (2)$$

式中： Z_{1j} 表示因素的下限； Z_{2j} 表示因素的上限； j 为因素个数， $j=1, 2, 3$ ； γ 为星号臂，根据二次回归通用旋转性的要求确定，即 $\gamma=2^{m/4}=1.682$ ，其中 m 为因素数。

根据线性变换：

$$x_j = (Z_j + Z_{pj}) / \Delta_j. \quad (3)$$

得出因素水平编码表 (表 2)。

表 2 华山松容器育苗试验因素水平编码

Table 2 Horizontal coding of factors in container seedling test of *Pinus armandii*

Z_j	x_1 氮肥施用量 Application amount of nitrogen fertilizer / %	x_2 磷肥施用量 Application amount of phosphate fertilizer / %	x_3 基质配比 The ratio of the substrate / %
+1.682	0.47	3.35	38.4
+1	0.40	2.80	35.0
0	0.30	2.00	30.0
-1	0.20	1.20	25.0
-1.682	0.13	0.65	21.6
Δ_j	0.10	0.80	5.0

其中氮肥选用尿素，溶于水后施用；磷肥选用过磷酸钙，不溶于水，直接施用于容器基质土内；根据中国容器育苗林业行业标准 LY/T1000—2013^[24]，确定本试验基质组成为羊粪、砂、黄心土以及菌根土，且羊粪占容器体积的 30%，菌根土占 10%，剩余体积由砂子和黄心土填充，因此通过砂占比的不同来表现营养土的不同配比。

1.3 试验布置实施及数据采集

试验布设前，将地块整理为长 6 m、宽 1 m、深 15 cm 的苗床，底部铺设透水土工布，方便后期起苗。根据回归旋转分析法，三因素试验分 20

个处理，每个处理 13 个重复。试验布置与实施依据试验编码 (表 2) 和试验设计 (表 3) 进行。容器基质配置时，磷肥选用过磷酸钙，直接混合在基质中进行施用。幼苗施用氮肥种类选为尿素，使用清水溶解后用注射器注入容器中，在出苗后 25 d 施 1 次，速生期 2 次 (苗龄 40 d、苗龄 54 d)，每次 50 mL。前期可在苗床上方搭建塑料拱棚以提高地温，加速华山松种子萌发，棚中心高 0.5 m，宽 1.2 m，并派专人定期进行除草和浇水。

试验开始于 2018 年 4 月初，同年 11 月初华山松幼苗停止生长后进行指标采集，采集指标包括苗高、地径、针叶数、轮数 (华山松幼苗针叶沿主干呈螺旋状向上生长，每生长一圈记为一轮)。

2 结果与分析

华山松容器苗各生长指标平均值如表 3 所示。

根据试验设计方法，华山松幼苗苗高、地径等数据与氮肥施用量、磷肥施用量以及基质配比之间的关系可以用二次回归旋转模型^[25]表示，即

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j x_j + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^m b_{jj} x_j^2. \quad (4)$$

式 (4) 中： \hat{y} 表示回归估计值； x_j 表示线性变换后的无因次变量； b_j 表示回归模型的一次项系数； b_{ij} 表示回归模型的交互项系数； b_{jj} 表示回归模型的二次项系数； m 表示因素数； j 表示因素的序号。将表 3 数据处理后，进行 F 检验，且 F 在 0.05 水平上显著，证明该试验所选的 3 个因素对于华山松苗高、地径等因素有显著影响。对回归模型中各回归系数进行 t 检验，并将不显著系数进行剔除后可得表 4。

2.1 影响华山松幼苗各生长指标的主效应分析

由于回归旋转分析的特点，设计中各因素均经过无量纲线性编码处理，且各项回归系数之间均不相关，所以可通过回归系数的绝对值大小直接比较各因素一次项对于华山松各生长指标的影响 (表 5)。

基质砂占比对于华山松幼苗各指标影响均为最小，基质砂占比影响基质的孔隙率进而影响基质透水透气的功能，这说明当孔隙率满足华山松幼苗对于水、气的需求后，土壤孔隙度的变化对华山松幼苗生长促进作用较小。相比而言，施肥更能促进华山松幼苗的生长，而氮肥施用量和磷肥施用量对华山松各生长指标均有不同程度的促进作用，其中磷肥对苗高和针叶数的促进作用更大，氮肥对地径的

表 3 华山松容器育苗试验设计及指标
Table 3 Design and indicators of container seedling test of *Pinus armandii*

试验号 Test No.	z_1 氮肥 N fertilizer	z_2 磷肥 P fertilizer	z_3 基质配比 The ratio of the substrate	y_1 苗高 Seeding height / cm	y_2 地径 Ground diameter / mm	y_3 针叶数 Number of needles / 个	y_4 轮数 Number of rounds / 轮	y_5 高径比 Height-diameter ratio
1	-1	-1	-1	4.73	2.32	47.00	8.09	20.39
2	-1	-1	1	5.43	2.33	55.00	8.00	23.30
3	-1	1	-1	5.46	2.30	57.00	7.73	23.74
4	-1	1	1	5.25	2.17	50.00	7.23	24.19
5	1	-1	-1	4.98	1.93	48.00	6.50	25.80
6	1	-1	1	5.05	2.04	48.00	7.10	24.75
7	1	1	-1	5.80	2.12	65.00	8.20	27.36
8	1	1	1	5.26	2.01	50.00	7.18	26.17
9	-1.682	0	0	4.78	2.04	48.00	7.33	23.43
10	1.682	0	0	5.80	1.94	66.00	6.56	29.90
11	0	-1.682	0	4.20	1.85	41.00	5.86	22.70
12	0	1.682	0	5.30	2.07	51.00	7.25	25.60
13	0	0	-1.682	5.10	2.30	47.00	8.00	22.17
14	0	0	1.682	5.40	2.20	53.00	7.33	24.55
15	0	0	0	5.40	2.08	52.00	7.31	25.96
16	0	0	0	5.39	2.08	57.00	7.22	25.91
17	0	0	0	5.39	2.25	56.00	8.10	23.96
18	0	0	0	5.40	2.19	55.00	7.67	24.66
19	0	0	0	5.40	2.22	49.00	7.50	24.32
20	0	0	0	5.80	2.19	53.00	7.49	26.48

表 4 华山松各生长指标与氮肥、磷肥施用量及基质配比关系的回归模型[†]
Table 4 Regression models of various growth indicators of *Pinus armandii*

指标 Indicators	回归模型 Regression models
苗高 Seeding height	$\hat{y} = 9.28 + 0.24x_1 + 0.43x_2 + 0.1x_1x_2 - 0.2x_1x_3 - 0.32x_2x_3 - 0.37x_2^2$
地径 Ground diameter	$\hat{y} = 2.17 - 0.08x_1 + 0.026x_2 + 0.04x_1x_2 - 0.045x_2x_3 - 0.044x_1^2 - 0.055x_2^2 + 0.048x_3^2$
针叶数 Number of needles	$\hat{y} = 53.62 + 2.36x_1 + 2.99x_2 + 1.75x_1x_2 - 2.00x_1x_3 - 3.75x_2x_3 + 1.53x_1^2 - 2.36x_2^2 - 0.95x_3^2$
轮数 Number of rounds	$\hat{y} = 7.53 - 0.25x_1 + 0.22x_2 - 0.16x_3 + 0.36x_1x_2 - 0.25x_2x_3 - 0.11x_1^2 - 0.25x_2^2 + 0.14x_3^2$

[†] x_1 : 氮肥浓度; x_2 : 磷肥施用量; x_3 : 基质砂占比。

x_1 means Nitrogen concentration, x_2 means phosphate fertilizer amount, x_3 means proportion of matrix sand.

表 5 各因素对华山松幼苗生长指标的影响结果
Table 5 Influencing factors of growth indicators of *Pinus armandii*

指标 Indicators	因素影响 Influencing factors
苗高 Seeding height	x_2 (磷肥施用量) > x_1 (氮肥浓度) > x_3 (基质砂占比)
地径 Ground diameter	x_1 (氮肥浓度) > x_2 (磷肥施用量) > x_3 (基质砂占比)
针叶数 Number of needles	x_2 (磷肥施用量) > x_1 (氮肥浓度) > x_3 (基质砂占比)
轮数 Number of rounds	x_1 (氮肥浓度) > x_2 (磷肥施用量) > x_3 (基质砂占比)

促进作用更明显。相关研究表明氮肥和磷肥对于苗木的生长均有促进作用^[26-27], 且合理的氮、磷肥配比可以有效提高苗木质量^[28], 因此需继续进行双因素分析, 找出氮肥、磷肥的最佳配比; 表 5 数据

也从另一方面说明秦岭北坡地区土壤氮、磷元素的缺乏, 在该地区进行种植生产时应该注意作物氮肥和磷肥缺失的问题。

2.2 氮肥磷肥交互因素效应分析

对华山松幼苗氮磷肥配比可以利用回归旋转分析法的两因素交互作用分析法进行探究。依据回归旋转分析, 剔除不显著系数后, 只有 x_1x_2 的系数为正, 即氮肥与磷肥的交互作用为正, 其余交互作用均为负值或不显著, 这说明只有氮肥与磷肥具有明显的交互作用, 这也与单因素分析得出的结果一致(表 4)。依据回归旋转分析, 将基质配比固定在 0 水平(即 $x_3=0$), 可得氮肥和磷肥对华山松幼苗各指标交互作用的模型(图 1)。

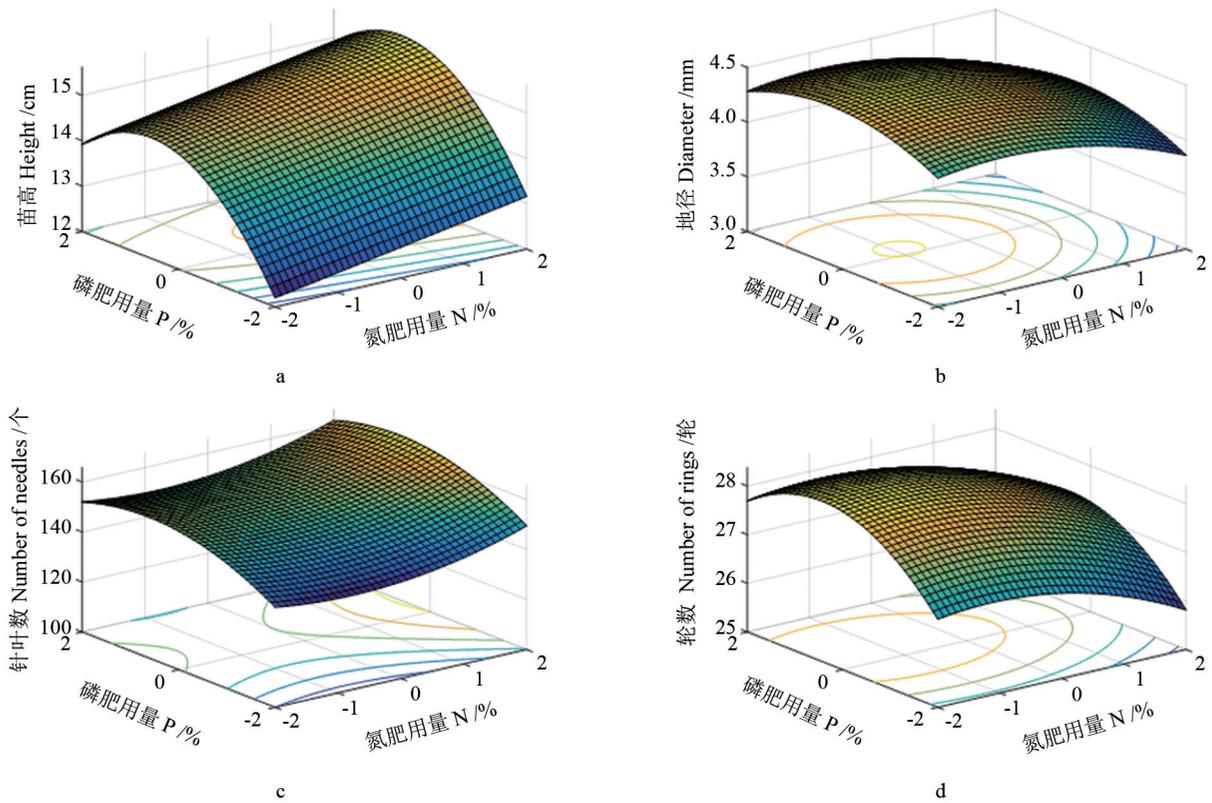


图1 氮肥与磷肥交互作用对华山松幼苗生长指标的影响

Fig. 1 Effects of interaction of nitrogen fertilizer and phosphorus fertilizer on growth indicators of *Pinus armandii* seedlings

由图1可以看出,随着磷肥用量的增加,华山松幼苗各项指标呈现出先增加后减少的趋势,这说明磷肥对于华山松幼苗各项指标均有促进作用,但过量施肥后,会对苗木的生长产生毒害作用。而当氮肥用量增加,华山松幼苗苗高与针叶数两项指标均相应增加(图1a、c),且在区间端点取得最大值,而地径与轮数两项指标则呈现出先增加后减少的趋势(图1b、d),这说明在氮肥用量区间内,华山松幼苗的苗高与针叶数没有达到最大值,但可以预测随着氮肥用量的继续增加,苗高与针叶数也会表现出先增加后减小的趋势,因此可以说明氮肥与磷肥一样存在最适区间。这一结果与已有研究相一致^[29-30],肥料的施用均有一个最适量,过量施用会导致毒害作用。

在任一磷肥用量条件下,氮肥浓度增加,华山松各项指标均会发生变化,并且均能在区间内取得极大值;当氮肥用量固定时,随着磷肥用量的增加,华山松各项指标会出现先增后减的趋势,且均可达到最大值(图1)。说明磷肥与氮肥可以相互作用促进苗木增长,且氮肥与磷肥的比值在一定范围($N:P=1.38$)时效果最佳。

从总体上来看,氮肥在华山松幼苗生长前期的过程中占有主要地位,随着氮肥浓度的增加,苗高和针叶数增加明显,这与单因素分析的结果相印证,

同时也与大部分学者得出的结论相一致:植物生长需求量最大的为氮肥,施入氮肥可以显著促进植物的生长^[26];而磷肥与氮肥具有相互促进作用,当 $N:P=1.38$ 时,华山松生长最佳,这也与沈佐等人对侧柏施肥研究得出的结论相印证^[31-32]。

2.3 华山松幼苗各生长指标对应的最优组合分析

由单因素分析可知,虽然基质砂占比对于华山松幼苗各指标影响最小但不能忽视,育苗基质作为苗木生长发育的载体,也是影响苗木质量的关键因素之一^[33],因此为确定各因素水平的最优组合,必须将氮肥施用量、磷肥施用量和基质砂占比三项指标同时分析,而本文所采用的旋转回归法可以很好的解决这个问题,利用统计选优方法,每个因素取5个水平: ± 1.682 , ± 1 和0用MATLAB对 $5^3=125$ 个方案进行寻优,分别得到各指标最优方案如下:

苗高、针叶数、轮数的最优方案一致,均在 $x_1=1.682$, $x_2=1.682$, $x_3=-1.682$ 时,各项指标达到最大值,华山松地径的最大值出现在 $x_1=-1.682$, $x_2=-1.000$, $x_3=1.682$ (表6)。苗木生产上利用高径比反映苗木质量,高径比反映了苗木高度与粗度的平衡关系,高径比小表示苗木矮壮,抗性较高。苗木生物量也是反映苗木物质积累的重要指标,

苗木生物量越大, 苗木质量越高, 但在本实验当前阶段无法对苗木进行破坏性测量, 而通过观察发现苗木各个针叶的重量大致相同, 针叶数越多则表示苗木生物量越大, 轮数同理, 因此利用针叶数与轮数代替苗木生物量指标。根据《中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1000—2013》以及前期预实验结果^[24], 苗木针叶数大于 64、轮数大于 8.2, 且高径比小于 20 的方案即为所求。

表 6 华山松幼苗各指标对应最优方案

Table 6 The optimal scheme for each growth indicators of *Pinus armandii*

指标 Indicators	最优方案因素组合 The optimal scheme		
苗高 Seedling height	$x_1=1.682$	$x_2=1.682$	$x_3=-1.682$
地径 Ground diameter	$x_1=-1.682$	$x_2=-1.000$	$x_3=1.682$
高径比 Height-diameter ratio	$x_1=1.682$	$x_2=-1.682$	$x_3=1.682$
针叶数 Number of needles	$x_1=1.682$	$x_2=1.682$	$x_3=-1.682$
轮数 Number of rounds	$x_1=1.682$	$x_2=1.682$	$x_3=-1.682$

根据寻优结果(表 7), 在如下范围内的方案均符合要求, 即氮肥浓度水平在 +1.252 ~ +1.657 之间, 磷肥用量水平在 +0.438 ~ +1.797 之间, 基质砂占比水平在 -1.997 ~ -0.438 之间, 其所对应的施肥量和基质配比与苗高、针叶数、轮数最优方案靠近(表 6), 据此, 可得到最终的方案: 施用氮肥浓度 0.47%、磷肥施用量 3.35%、基质砂占比 21.60%。

表 7 华山松幼苗各指标对应因素 95% 置信区间

Table 7 95% confidence intervals for each growth indicators of *Pinus armandii*

指标 Indicators	氮肥施用量 Application amount of nitrogen fertilizer	磷肥施用量 Application amount of phosphate fertilizer	基质配比 The ratio of the substrate
针叶数 Number of needles > 64	(1.252, 1.657)	(0.438, 1.797)	(-0.438, -1.797)
轮数 Number of rounds > 8.2	(-3.340, 3.304)	(-1.637, 2.830)	(-4.370, 2.229)
高径比 Height- diameter ratio < 20	(0.754, 1.865)	(-3.517, 1.972)	(1.400, 1.691)

通过分析基质原有氮、磷含量以及后期施用氮肥、磷肥的量可以得出容器中 N:P=1.38, 这与氮、磷交互作用分析得出的结论一致, 并且与胡刚等^[18]得出的华山松生长期肥料比例以 N、P、K 为 3:2:2 结论相近。基质的砂占比为 21.60%, 对应土壤总孔隙度为 58.35%, 这与李永峰^[10]得出的适宜育苗基质的总孔隙度要在 54% 以上相符合。即氮肥施用浓度 0.47%、磷肥量 3.35%、基质砂占

比 21.60% 系秦岭北坡华山松最佳培育方案。在其他地区进行华山松容器育苗时, 育苗容器基质总氮含量与磷含量比值应为 1.38, 土壤孔隙度应为 58.35%, 苗木生长较佳。

综上所述, 秦岭北坡进行华山松容器育苗时, 最佳方案为氮肥施用浓度 0.47%、磷肥量 3.35%、基质砂占比 21.60% (基质组成: 羊粪 30%、菌根土 10%、砂子 21.60%、黄心土 38.40%)。

3 结论与讨论

利用三因素二次回归通用旋转设计, 将容器育苗基质配比、氮肥和磷肥施用量进行了统一考虑, 并分别进行单因素、双因素和三因素分析, 得出以下结论:

1) 影响华山松容器苗苗高的因素主次为: x_2 (磷肥) > x_1 (氮肥) > x_3 (基质砂占比); 地径: x_1 (氮肥) > x_2 (磷肥) > x_3 (基质砂占比); 针叶数: x_2 (磷肥) > x_1 (氮肥) > x_3 (基质砂占比); 轮数: x_1 (氮肥) > x_2 (磷肥) > x_3 (基质砂占比), 说明氮肥和磷肥在华山松幼苗生长中占有主要作用, 而基质砂占比则作用较弱, 因此在进行华山松容器苗培育时, 需要着重注意氮肥和磷肥的施用, 而基质只需保证透水透气性良好即可。

2) 三个因素中仅有氮肥与磷肥具有交互作用, 且氮肥对于华山松生长作用明显, 磷肥可以使氮肥的效果更好, 氮肥与磷肥交互作用明显, 在 N:P 为 1.38 时, 华山松幼苗生长最佳, 氮肥和磷肥的交互作用可以使华山松对肥料的利用率更高, 在 N:P 为 1.38 时达到最高, 因此其他地区进行华山松容器育苗时, 可以根据当地土壤条件的不同, 配置不同的施肥量, 只要保证华山松幼苗可利用的氮和磷含量充足且 N:P 为 1.38, 即可以保证华山松幼苗的在肥料利用方面达到最佳。

3) 秦岭北坡华山松最佳基质配比为土:砂:羊粪:菌根土体积比 3.8:2.2:3:1, 施肥方案为: 氮肥(尿素)分 3 次施入, 时间分别是: 苗龄 25 d、40 d、54 d, 施用量为每株苗木 0.47 g, 磷肥在配置基质时施入, 施用量为每 100 kg 基质 3.35 kg。根据试验结果为秦岭北坡华山松容器育苗提供了最佳的基质配比与施肥方案, 在生产实践中可以直接利用。

4) 本试验解决了秦岭北坡华山松容器育苗问题, 由于各地区土壤、气候条件不同, 研究结果无法直接运用到其他地区, 具有一定局限性。但本试验所用到的回归通用旋转组合设计法可以进行相应的推广, 进行进一步的扩展, 将回归通用

旋转组合设计推广到其他地区华山松育苗技术研究或其他苗木的容器育苗技术研究中,从而用较少的实验次数得出最佳的基质配比和施肥方案,为容器育苗技术的探究提供了一种便捷的方法。

参考文献:

- [1] 徐伟恒,吴超,杨磊,等.滇东北地区华山松与云南松的地表凋落物载量及火强度对比研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2019,39(5):151-156.
XU W H, WU C, YANG L, et al. Comparative study on surface litter load and fire intensity of *Pinus Armandii* and *Pinus yunnanensis* in northeastern Yunnan province[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences),2019,39(5):151-156.
- [2] 刘洪山.华山松播种育苗技术[J].现代农村科技,2014(15):52.
LIU H S. Technology of seeding and seedling of *Pinus armandii*[J]. Modern Rural Science and Technology,2014(15):52.
- [3] 赵杨,李桐森,段安安.国内华山松遗传改良的研究进展及发展策略[J].西南林学院学报,2003,23(1):91-95.
ZHAO Y, LI T S, DUAN A A. A research advance in genetic improvement and development strategy of *Pinus armandii* in China[J]. Journal of Southwest Forestry College,2003,23(1):91-95.
- [4] 王欢,李栋梁.气候变暖背景下全球海温对中国东部夏季降水年代际转折的影响[J].热带气象学报,2019,35(3):398-408.
WANG H, LI D L. The impacts of global sea surface temperature on decadal transitions of summer precipitation over eastern China at global warming transition points[J]. Journal of Tropical Meteorology,2019,35(3):398-408.
- [5] 胡睦荫,蔡庭付,吴夏华,等.工厂化容器育苗研究进展[J].安徽农业科学,2007,35(14):4099-4100.
HU Y M, CAI T F, WU X H, et al. Research progress of factory container seedling[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2007,35(14):4099-4100.
- [6] 尹爱国.鲁中山区容器育苗技术研究[J].农业科技通讯,2019(7):256-258.
YIN A G. Research on container seedling technology in Shandong Zhongshan area[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2019(7):256-258.
- [7] 陈凤英,缪美琴,袁国胜.我国容器育苗现状及其技术发展趋势[J].林业科技开发,1989(2):1-5.
CHEN F Y, MIAO M Q, YUAN G S. The present situation and technology development trend of container seedling in China[J]. Journal of Forestry Engineering,1989(2):1-5.
- [8] 曾进,吴吕奇,黄梓明,等.不同育苗方式对晚松不同种源苗期生长及生物量的影响[J].中南林业科技大学学报,2018,38(5):115-120.
ZENG J, WU L Q, HUANG Z M, et al. Effect on difference of growth and biomass about *Pinus rigida* var. *serotina* in different ways of seeding[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018,38(5):115-120.
- [9] 刘艳.林业育苗现状及容器育苗技术[J].黑龙江科学,2017,18(8):84-85.
LIU Y. Present situation of forestry nursery and container seedling technology[J]. Heilongjiang Science,2017,18(8):84-85.
- [10] 李永峰.油松、华山松及白皮松容器育苗基质配方研究[J].科技情报开发与经济,2008,18(34):95-97.
LI Y F. Research on the formula of the base materials for the container seedling of the Pitch pine, China Armand pine and White Bark pine[J]. Journal of Library and Information Science, 2008,18(34):95-97.
- [11] 马占良.设施华山松穴盘播种育苗技术[J].陕西农业科学,2013,59(5):269.
MA Z L. Facility *Pinus armandii* hole disc seeding seedling technology[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences,2013,59(5):269.
- [12] 张晓梅,薛成杰.华山松营养钵大田育苗对比试验[J].农业科技与信息,2014(14):49-51.
ZHANG X M, XUE C J. Comparative experiment of seedling cultivation in nutrient bowl field of *Pinus armandii*[J]. Agricultural Science-Technology and Information,2014(14):49-51.
- [13] 武捷,张健唯,安烁宇,等.基质配方对酸柚苗生物量及矿质元素含量的影响[J].经济林研究,2019,37(1):161-166.
WU J, ZHANG J W, AN S Y, et al. Effects of substrate formulations on biomass and mineral element contents in sour pomelo seedlings[J]. Non-wood Forest Research,2019,37(1):161-166.
- [14] 傅国林,龙伟,余裕龙,等.轻基质组分对油橄榄扦插容器育苗的影响[J].经济林研究,2019,37(2):176-181,197.
FU G L, LONG W, YU Y L, et al. Effects of light substrate composition on container cutting seedlings in *Olea europeae*[J]. Non-wood Forest Research,2019,37(2):176-181,197.
- [15] 伏彩娟.华山松良种容器育苗技术[J].现代园艺,2016(9):78.
FU C J. Container seedling technology of fine seed of *Pinus armandii*[J]. Xiandai Horticulture, 2016(9):78.
- [16] 袁小军,周幼成,吴喜昌,等.氮磷钾配比施肥对油茶芽生长及分化的影响[J].经济林研究,2019,37(03):1-8,36.
YUAN X J, ZHOU Y C, WU X C, et al. Effects of N, P and K proportional fertilization on flower bud growth and differentiation in *Camellia oleifera*[J]. Non-wood Forest Research, 2019,37(3):1-8,36.
- [17] 张永恩.华山松容器育苗[J].中国林业,2007(24):46.
ZHANG Y E. *Pinus armandii* seedlings in containers[J]. Forestry of China, 2007(24):46.
- [18] 胡刚,尹晓阳,朱忠荣,等.马尾松、华山松容器育苗施肥研

- 究[J]. 林业科技开发,2006(1):48-51.
- HU G, YIN X Y, ZHU Z R, et al. A preliminary study on fertilization for container seedlings of *Pinus massoniana* and *Pinus armandi*[J]. Journal of Forestry Engineering, 2006(1):48-51.
- [19] 芦鑫, 殷淑燕, 高涛涛. 1960—2017年秦岭南北地区降雨侵蚀力的时空变化特征研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2019, 46(3):380-390.
- LU X, YIN S Y, GAO T T. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in the northern and southern regions of Qinling mountains from 1960 to 2017[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2019,46(3):380-390.
- [20] 芦鑫, 殷淑燕, 王水霞, 等. 秦岭南北地区农业气候资源时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2018,27(8):1866-1878.
- LU X, YIN S Y, WANG S X, et al. Temporal and spatial variation of agricultural climatic resources in the northern and southern regions of the Qinling mountains[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018,27(8):1866-1878.
- [21] 高国庆. 秦岭林区森林水质长期变化及其趋势研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- GAO G Q. The long-term variation of forest water quality and its trend in the Qinling forest region[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [22] 袁志发, 俞海燕. 试验设计与分析[M]3版. 北京: 中国农业出版社, 2007:52-53.
- YUAN Z F, YUN H Y. Test design and analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2007:52-53.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000:253-267.
- BAO S D. Agrochemical analysis of soil[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:253-267.
- [24] 国家林业局. LY/T 1000—2013 容器育苗技术中华人民共和国林业行业标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- State Forestry Administration. LY/T 1000—2013 Container seedling technology forestry industry standard of the People's Republic of China[S]. Beijing: China Standard Press, 2013.
- [25] 郭德金. 关于试验设计有关问题的讨论(II)[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2010,17(3):275-280.
- GUO D J. Discussion on experimental design (Part II)[J]. Journal of Eastern Liaoning University (Natural Science Edition), 2010,17(3):275-280.
- [26] 左海军, 马履一, 王梓, 等. 苗木施肥技术及其发展趋势[J]. 世界林业研究, 2010,23(3):39-43.
- ZUO H J, MA L Y, WANG Z, et al. Research on fertilizer application technology for seedlings and its development trends[J]. World Forestry Research, 2010,23(3):39-43.
- [27] 左永忠, 申增元, 宋珍, 等. 氮磷镁对合欢幼苗生长效应的研究[J]. 河北林果研究, 1997,12(1):66-70.
- ZUO Y Z, SHEN Z Y, SONG Z, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and magnesium on growth of *albizia* seedlings[J]. Forestry and Ecological Sciences, 1997,12(1):66-70.
- [28] 邝雷, 邓小梅, 余斐, 等. 氮、磷、钾配比施肥对任豆容器苗生长的影响[J]. 华南农业大学学报, 2014,35(6):79-82,88.
- KUANG L, DENG X M, YU F, et al. Effects of fertilization on the growth of *Zenia insignis* container seedlings[J]. Journal of South China Agricultural University, 2014,35(6):79-82,88.
- [29] WRIGHT S J, YAVITT J B, WURZBURGER N, et al. Potassium, phosphorus, or nitrogen limit root allocation, tree growth, or litter production in a lowland tropical forest[J]. Ecology, 2011,92(8):1616-1625.
- [30] SANTIAGO L S, WRIGHT S J, HARMS K E, et al. Tropical tree seedling growth responses to nitrogen, phosphorus and potassium addition[J]. Journal of Ecology, 2012,100(2):309-316.
- [31] 沈佐, 孙时轩. 苗圃施肥研究综述[J]. 世界林业研究, 1992(3):22-29.
- SHEN Z, SUN S X. Research review on fertilizer application in nursery[J]. World Forestry Research, 1992(3):22-29.
- [32] 沈佐, 孙时轩, 屠泉洪. 侧柏苗(1+0)施用氮、磷、钾效果的研究[J]. 林业科学, 1989,25(5):401-409.
- SHEN Z, SUN S X, TU Q H. A study on the effect of applying N, P and K to *Oriental arborvitae* seedlings (1+0)[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1989,25(5):401-409.
- [33] 邓煜, 刘志峰. 温室容器育苗基质及苗木生长规律的研究[J]. 林业科学, 2000,36(5):33-39.
- DENG Y, LIU Z F. Study on growing medium and growth law for containerized seedling stocks grown in greenhouse[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000,36(5):33-39.

[本文编校: 吴 彬]