

# 控释肥和灌溉方式对栓皮栎容器苗苗木质量及造林效果的影响

孙巧玉, 刘 勇\*

(北京林业大学林学院, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 探讨控释肥和灌溉方式对栓皮栎 (*Quercus variabilis* Bl.) 容器苗生长、养分含量、基质电导率 (EC) 及 2 年造林效果的影响, 为培育高质量苗木提供参考。[方法] 以栓皮栎容器苗为研究对象, 采用双因素完全随机试验设计, 设置 5 个施肥水平 (以 N 元素含量为基准, 5 个施肥水平分别为: 25、75、125、175、225 mg · 株<sup>-1</sup>) 和 2 种灌溉方式 (上方喷灌 (O)、底部渗灌 (S)), 测定栓皮栎容器苗形态指标、养分含量、根系生长、基质 EC 值及连续 2 年造林效果。[结果] 表明: (1) 施肥量和灌溉方式二者对苗木形态指标影响存在交互效应, 225-O 处理的苗木地径、根生物量、单株生物量最大, 但根生物量、单株生物量在 225-O、125-S、175-O 处理之间差异不显著。225-S 处理的苗高、茎生物量、茎根比最大, 茎生物量在 225-S 与 225-O 之间差异不显著。(2) 苗木茎、根的氮磷钾浓度和含量随施肥量的增加而增大, 施肥量 125、175、225 mg · 株<sup>-1</sup> 处理之间的根氮、磷含量及单株磷含量差异不显著。(3) 增加施肥量促进苗木根系的生长, 施肥量为 125、175、225 mg · 株<sup>-1</sup> 处理之间的根系表面积、体积差异不显著。(4) 基质 EC 值随施肥量的增加而增大, 底部渗灌显著提高了基质上层、下层的 EC 值, 基质上层、下层的最大 EC 值分别为 4.69、0.56 dS · m<sup>-1</sup>, 没有对苗木生长产生不利影响。(5) 和上方喷灌相比, 底部渗灌显著地促进造林第 1 年幼树的树高、地径生长; 造林第 1 年、第 2 年的树高和地径均随施肥量的增加而增大, 造林第 2 年, 施肥量 125、175、225 mg · 株<sup>-1</sup> 处理之间的树高、地径差异不显著。[结论] 底部渗灌提高了栓皮栎容器苗体内的养分含量, 促进了造林第 1 年幼树树高、地径的生长。施加控释肥有利于苗期苗木质量的提高及造林后苗木的快速生长。综合考虑苗木质量、经济效益、环境利益, 培育栓皮栎容器苗可选择底部渗灌和控释肥量为 125 mg · 株<sup>-1</sup> 的组合 (以 N 元素含量为基准)。

**关键词:** 控释肥; 底部渗灌; 栓皮栎容器苗; 苗木质量; 造林效果

中图分类号: S791

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)05-0137-08

## Effect of Controlled-release Fertilizer and Irrigation Method on Seedling Quality and Outplanting Performance of *Quercus variabilis*

SUN Qiao-yu, LIU Yong

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education; Forestry College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the effects of fertilizer rate and irrigation method on morphological attributes, nutrient status, medium electrical conductivity (EC) and 2-years' outplanting performance of containerized *Quercus variabilis* seedlings. [Method] Seedlings were raised with 5 fertilizer rates (25, 75, 125, 175, and 225 mg · plant<sup>-1</sup>) and 2 irrigation methods (overhead irrigation (O) and subirrigation (S)). The experiment was a two-factor completely randomize design. Morphological attributes, nutrient status, root growth, medium EC, and 2-years' outplanting performance were measured. [Result] Interaction of fertilizer rate and irrigation method significantly affected seedling growth. The root-collar diameter, root and total biomass of seedling reached maximum value with

收稿日期: 2017-08-24

基金项目: "948" 计划资助项目 "容器苗底部渗灌技术引进" (2012-4-66)

作者简介: 孙巧玉 (1987—), 女, 博士研究生, 主要从事林木种苗培育理论与技术研究. Email: sunqy201306@163.com

\* 通讯作者: 刘勇 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事林木种苗培育理论与技术研究. Email: lyong@bjfu.edu.cn

225-O treatment. There was no significant difference on root and total plant biomass among 225-O, 125-S, and 175-O. The height, stem biomass, and S/R ratio of seedling reached maximum value with 225-S treatment. There was no significant difference on stem biomass among 225-S and 225-O. The nutrient concentration and content were improved with increasing fertilizer rate. There was no significant difference on root N, P content and total P content among 125, 175, and 225 mg · plant<sup>-1</sup>. Increasing fertilizer rate promoted root growth. There was no significant difference on root surface area and volume among 125, 175, and 225 mg · plant<sup>-1</sup>. Fertilization resulted in high medium EC. Subirrigation significantly increased medium EC in upper and bottom layer. The highest medium EC reached 4.69 dS · m<sup>-1</sup> but did not have harmful effect on seedlings. Subirrigation improved the height and root-collar diameter of seedlings 1 year after outplanting. 2 years after outplanting, the height and root-collar diameter of seedlings grew greatly with increasing fertilizer rate, but there was no significant difference on height and root-collar diameter of seedlings among 125, 175, and 225 mg · plant<sup>-1</sup>. [ **Conclusion** ] Subirrigation improves nutrient content and 1-year's outplanting performance. Controlled-release fertilizer increased seedlings quality, and 2-years' outplanting performance. Considering seedling quality, economic benefits and environmental value, fertilizer rate of 125 mg · plant<sup>-1</sup> and subirrigation was the optimum combination for container seedling production of this species.

**Keywords:** controlled-release fertilizer; subirrigation; *Quercus variabilis* container seedling; seedlings quality; outplanting performance

植苗造林可以弥补森林自然更新缓慢的缺陷<sup>[1]</sup>,是我国主要的造林方式之一<sup>[2]</sup>。与裸根苗相比,容器苗因有容器保护,在起苗、运输和造林过程中可以有效避免根系损伤<sup>[3-4]</sup>,提高造林成活率,促进苗木早期生长<sup>[5]</sup>。然而,由于容器体积有限,限制根系生长,影响苗木对水分和养分的吸收。因此,苗期水肥管理成为培育高质量容器苗的关键环节。

施肥可以促进苗木生长和养分积累<sup>[6]</sup>,进而降低造林死亡率,促进苗木造林后早期生长<sup>[7]</sup>,提高苗木耐胁迫的能力<sup>[8]</sup>。控释肥具有随苗木生长缓慢释放养分的特点<sup>[9]</sup>,可在整个生长季持续提供养分,减少养分淋溶<sup>[10]</sup>,避免水溶性肥的不利影响<sup>[11]</sup>,造林后还可继续释放养分<sup>[12]</sup>。国外已将控释肥广泛应用于苗木培育<sup>[6, 13-15]</sup>,国内对控释肥的研究主要集中在农作物<sup>[16]</sup>和长白落叶松(*Larix olgensis* Henry)<sup>[17-19]</sup>的生长及养分积累上,而在阔叶树种育苗<sup>[20-21]</sup>及对造林效果的影响方面研究报道很少。容器苗底部渗灌技术采用封闭式水分循环系统,从容器底部供水,利用基质毛细管作用吸收水分达到灌溉目的。这样苗木充分利用水分和养分,避免因养分淋溶造成环境污染,能最大限度地节水节肥<sup>[22]</sup>。由于底部渗灌系统为封闭式水分循环系统,容易引起肥料在基质和蓄水池中积累,因此,肥料种类和施肥量显得尤其重要。

栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)是我国温带、暖温带、亚热带地区阔叶林及针阔混交林的主要树

种<sup>[23]</sup>。国内对栓皮栎育苗灌溉制度和水肥需求规律开展了大量研究,确定了栓皮栎容器苗的最佳灌溉水量<sup>[24-26]</sup>及水溶肥的最佳施肥量<sup>[24,27]</sup>,但有关控释肥在栓皮栎容器育苗中的应用以及控释肥和灌溉方式对栓皮栎容器苗质量及造林效果的影响缺少研究。本研究以栓皮栎容器苗为试验材料,研究控释肥和灌溉方式对其容器苗生长、养分状况、基质电导率(EC)及造林效果的影响,确定适宜的控释肥施肥量,以期为高质量栓皮栎容器苗精准施肥提供参考。

## 1 试验材料及试验地概况

2013年9月初,在北京市平谷区四座楼栓皮栎良种基地(40.27° N, 117.12° E)采集种子,带回实验室进行预处理。将栓皮栎种子浸泡在50℃温水中30 min,杀死象鼻虫,同时去除漂浮在水面的劣种。将挑选好的种子阴干后,置于2℃冰箱中贮存备用。育苗试验在北京林业大学鹫峰林场森林培育学科温室(40.05° N, 116.08° E)内进行。2014年4月初,对栓皮栎种子进行催芽;4月15日,将萌发种子播种于装有泥炭(丹麦 Pindstrup Mosebrug A/S公司,5号基质)和珍珠岩混合基质(3V:V)的育苗容器(D60,体积983 cm<sup>3</sup>,直径6.8 cm × 长度36 cm;美国 Stuewe & Sons公司,硬塑料聚丙烯材质)中,同时,基质中加入控释肥(14N-13P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-13K<sub>2</sub>O,释放期5~6个月,济南乐喜施肥料有限公司),充分

混匀。

造林试验地位于北京林业大学鹫峰林场森林培

育学科造林试验地,属于温带季风气候,年平均气温 $13^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量 $629\text{ mm}$ 。土壤理化性质见表1。

表1 试验地土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of soil in the experiment

土壤深度 Soil depth /cm	粘粒 Clay/%	粉粒 Powder/%	砂粒 Sand/%	pH 值	有机质含量 Organic content /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全氮含量 Nitrogen content /( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有效磷含量 Available phosphorus content/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾含量 Effective potassium content/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
0~30	7.63	31.95	60.42	7.74	7.12	843.96	112.10	373.48
30~60	7.62	33.63	58.75	7.74	3.46	479.09	80.45	329.79

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

采用双因素完全随机试验设计,因素1为控释肥量,以N元素含量为基准,5个施肥水平分别为:25、75、125、175、225  $\text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$ ;因素2为灌溉方式,2个水平,分别为上方喷灌(O)和底部渗灌(S)。试验共10个处理,每处理设置3个重复,每重复20株,共计600株苗。

### 2.2 苗期管理

育苗环境为自然光,温室昼夜温度为 $30^{\circ}\text{C}/20^{\circ}\text{C}$ 。播种后,每隔1d进行上方喷灌浇水,保持基质湿润,直至幼苗出齐。5月15日至9月15日,对苗木进行上方喷灌(利用花洒喷头从上部喷水灌溉)和底部渗灌(储存箱当做蓄水槽,将苗木放入装有水的储存箱中,苗木从容器底部吸水灌溉)处理。灌溉参数采用称质量法确定<sup>[28]</sup>,当基质含水量低于其饱和含水量的75%时进行补水灌溉。9月15日后,当基质含水量低于其饱和含水量的60%时进行补水灌溉,促进苗木木质化。10月30日,将苗木移至室外,直至叶片掉落。育苗期间,每隔1周对苗木进行位置调换,以减小边缘效应,喷洒浓度为0.1%的50%多菌灵可湿性粉剂进行杀菌。

### 2.3 造林试验

2014年12月至次年2月,在室外挖1m深的假植穴,将苗木放置假植穴中,充分浇水后,用草帘封盖,御寒越冬。

2015年3月下旬进行造林试验,5个施肥水平和2种灌溉方式,共10个处理,每处理设置3个重复,每重复10株苗,株行距为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ ,外围设置若干保护行。造林结束后充分灌水1次,生长期,不再进行灌溉和施肥处理,每隔1周进行1次除草工作。

### 2.4 指标测定

2014年9月15日,在最后1次底部渗灌结束后,使用电导率快速测定仪(8 in - 2265 FS; Spectrum

Technologies 公司)分别测定容器中基质上层(3 cm)和下层(30 cm)的基质电导率(EC)。11月24日,每处理每个重复随机选取5株苗,测定苗高和地径。随后进行破坏取样,用水小心洗掉根系周围的基质,并用蒸馏水润洗2次。从地径处剪开,将茎、根分开,分别装入信封,带回实验室,使用根系扫描仪(Epson perfection V700 Photo/V750 PRO;美国Epson公司)迅速对根系进行扫描,用WinRHIZO根系分析软件(加拿大Regent Instrument公司)对根系表面积和体积进行分析;随后放入烘箱, $65^{\circ}\text{C}$ 烘干72h至恒质量,用电子天平( $\pm 0.001\text{ g}$ )测定生物量。将每个重复的5株苗混合,粉碎,过0.25 mm筛,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮法进行消煮,凯氏定氮法测定全氮含量(UDK-159,意大利VELP Scientifica公司),钼锑抗吸光度法测定全磷含量(Agilent-8453,美国Agilent Technologies公司),火焰光度计法测定全钾含量(Spectra AA Varian 220,美国Varian公司)<sup>[29]</sup>。

2015年10月13日和2016年10月13日分别调查苗木造林成活率、树高和地径。

### 2.5 数据分析

采用Excel 2007统计数据,用PASW18.0软件对数据进行Two-way ANOVA分析,若处理间差异显著,采用Duncan法在0.05水平上进行多重比较。利用Excel 2007和Sigma Plot 12.5软件制作数据表格和绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 施肥量和灌溉方式对栓皮栎容器苗生长的影响

由表2可知:施肥量和灌溉方式二者对苗高、地径、生物量和茎根比的影响存在交互效应( $P < 0.05$ )。多重比较发现:225-O处理的地径、根和单株生物量最大,分别为5.77 mm、11.24 g和13.81 g。225-O与125-O、175-O、125-S、175-S之间的根生物量差异不显著,225-O与175-O、125-S之间的单株

生物量差异不显著。225-S 的苗高、茎生物量和茎根比最大,分别为 55.2 cm、2.81 g 和 0.36;225-S 与 225-O 间的茎生物量差异不显著。2 种灌溉方式下,苗高、地径和茎生物量均随施肥量的增加而增大;上

方喷灌的根和单株生物量随施肥量的增加而增大,底部渗灌的根和单株生物量随施肥量的增加呈先增大后减小的趋势,当施肥量大于 125 mg·株<sup>-1</sup>时,根和单株生物量开始下降。

表 2 施肥量和灌溉方式对栓皮栎容器苗形态指标的影响及方差分析

Table 2 Effect of fertilizer rates and irrigation methods on *Q. variabilis* seedling morphological attributes and associated  $P > F$

处理组合 Combinations	苗高 Height/cm	地径 Root-collar diameter/mm	生物量 Biomass/g			茎根比 Ratio of S:R
			茎 Stem	根 Root	单株 Plant	
25-O	36.2 ± 0.8 e	3.89 ± 0.10 f	1.09 ± 0.08 e	6.80 ± 0.49 e	7.89 ± 0.53 d	0.17 ± 0.01 de
75-O	40.2 ± 1.1 d	4.45 ± 0.09 e	1.42 ± 0.10 de	9.24 ± 0.67 bc	10.66 ± 0.74 bc	0.16 ± 0.01 e
125-O	43.1 ± 1.2 c	4.78 ± 0.09 d	1.76 ± 0.10 d	9.98 ± 0.58 ab	11.74 ± 0.61 bc	0.18 ± 0.01 cde
175-O	43.8 ± 0.6 c	5.14 ± 0.10 b	2.10 ± 0.11 c	10.16 ± 0.54 ab	12.26 ± 0.62 ab	0.21 ± 0.01 bcd
225-O	53.6 ± 0.9 a	5.77 ± 0.17 a	2.57 ± 0.26 ab	11.24 ± 0.55 a	13.81 ± 0.71 a	0.23 ± 0.02 bc
25-S	36.1 ± 0.2 e	3.81 ± 0.11 f	1.20 ± 0.09 e	7.12 ± 0.50 cd	8.32 ± 0.55 d	0.18 ± 0.01 de
75-S	44.1 ± 0.6 c	4.46 ± 0.10 e	1.60 ± 0.06 d	8.57 ± 0.60 bed	10.17 ± 0.57 c	0.20 ± 0.02 bcde
125-S	47.9 ± 0.8 b	4.80 ± 0.07 d	2.77 ± 0.09 c	10.15 ± 0.68 ab	12.22 ± 0.68 ab	0.21 ± 0.02 bcd
175-S	49.5 ± 1.2 b	4.83 ± 0.09 cd	2.24 ± 0.12 bc	9.62 ± 0.46 abc	11.86 ± 0.51 bc	0.24 ± 0.02 b
225-S	55.2 ± 1.4 a	5.10 ± 0.08 bc	2.81 ± 0.15 a	8.04 ± 0.60 cde	10.85 ± 0.71 bc	0.36 ± 0.03 a
方差分析显著性 ( $P > F$ )						
施肥量 Fertility rates	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
灌溉方式 Irrigation methods	<0.000 1	0.001	0.020	0.032	0.140	<0.000 1
施肥量 × 灌溉方式 F × I	0.014	0.003	<0.000 1	0.019	0.047	0.002

注:表中字母为 Duncan 多重比较结果,同列相同字母表示差异不显著,同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ );下同。

Notes: Column values not followed by the same letter are significantly different according to Duncan's test. The same below.

### 3.2 施肥量和灌溉方式对栓皮栎容器苗养分状况的影响

3.2.1 对栓皮栎容器苗养分浓度的影响 双因素方差分析结果表明,施肥量和灌溉方式二者对苗木茎、根的氮、磷、钾浓度的影响不存在交互效应。施肥量对茎和根的氮、磷浓度影响差异显著 ( $P < 0.05$ ),对茎和根的钾浓度影响差异不显著;灌溉方式对苗木养分浓度均无显著影响(未列方差分析结果)。从图 1 可看出:苗木的氮、磷、钾浓度均随施肥量的增加而增大,当施肥量为 225 mg·株<sup>-1</sup>时,茎和根的氮浓度、茎和根的磷浓度达到最大,分别为 8.9 和 10.2 g·kg<sup>-1</sup>、2.3 和 1.9 g·kg<sup>-1</sup>,明显高于其他处理。茎的磷浓度在施肥量 175、225 mg·株<sup>-1</sup>间差异不显著,根的磷浓度在施肥量 125、175、225 mg·株<sup>-1</sup>间差异不显著。

3.2.2 对栓皮栎容器苗养分含量的影响 双因素方差分析结果表明,施肥量和灌溉方式二者对茎、根、单株的氮、磷、钾含量的影响不存在交互效应。施肥量对茎、根、单株的氮、磷、钾含量的影响均达到显著水平 ( $P < 0.05$ );灌溉方式对茎的氮、钾含量影响显著 ( $P < 0.05$ ),而对根、单株的氮、磷、钾含量影响不显著(未列方差分析结果)。苗木茎、根、单株

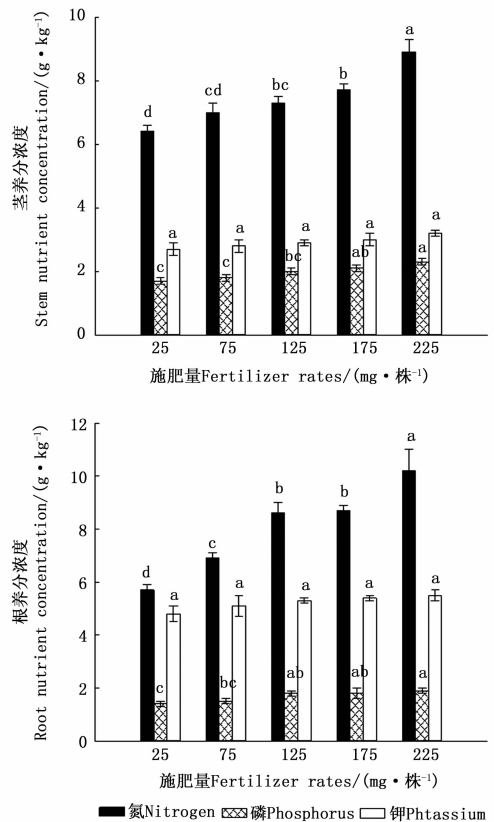


图 1 施肥量对茎、根氮磷钾浓度的影响

Fig. 1 Effect of fertilizer rates on N, P, K concentration of stem, root of seedlings

的氮、磷、钾含量均随施肥量的增加而增大,且在施肥量 225 mg · 株<sup>-1</sup>时达最大。根的氮、磷、钾含量和单株的磷、钾含量在施肥量 125、175、225 mg · 株<sup>-1</sup>

间差异不显著(图2)。底部渗灌的茎氮、钾含量比上方喷灌的分别提高了17.2%、19.6%(图3)。

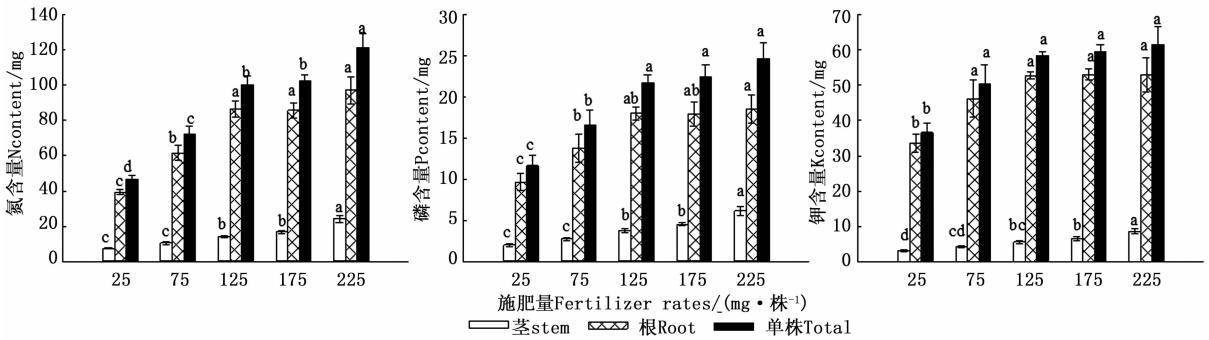


图2 施肥量对茎、根、单株的氮磷钾含量的影响

Fig.2 Effect of fertilizer rates on N,P,K content of stem, root, and total of seedlings

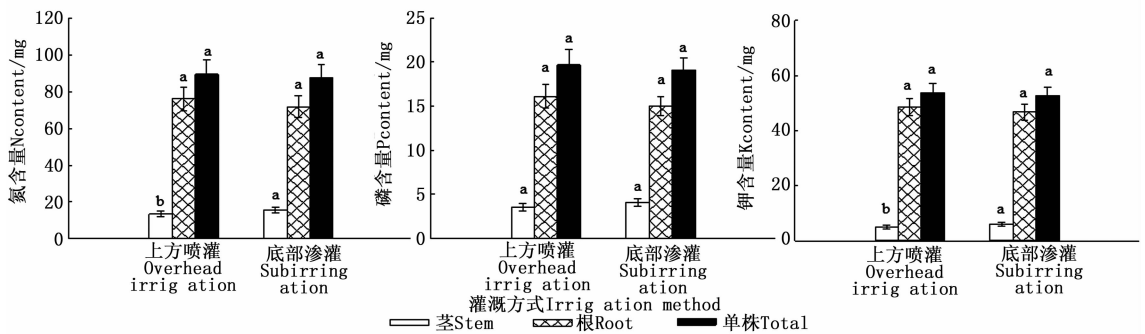


图3 灌溉方式对茎、根、单株的氮磷钾含量的影响

Fig.3 Effect of irrigation method on N,P,K content of stem, root, and total of seedlings

### 3.3 施肥量和灌溉方式对栓皮栎容器苗根系生长、基质 EC 值的影响

3.3.1 施肥量和灌溉方式对根系生长的影响 双因素方差分析结果表明,施肥量和灌溉方式二者对根系表面积、体积的影响不存在交互效应。施肥量对根系表面积、体积的影响差异显著( $P < 0.05$ ),灌溉方式对根系表面积、体积影响不显著(未列方差分析结果)。根系表面积和体积随施肥量的增加而增大,当施肥量增加到 225 mg · 株<sup>-1</sup>时,根系表面积和体积达最大,分别为 184 cm<sup>2</sup> 和 3.18 cm<sup>3</sup>。高施肥量(125、175、225 mg · 株<sup>-1</sup>)间的根系表面积、体积差异不显著,但比低施肥量(25、75 mg · 株<sup>-1</sup>)分别提高了7%~25%和12%~23%(图4)。

3.3.2 施肥量和灌溉方式对基质 EC 值的影响 双因素方差分析结果表明,施肥量、灌溉方式及二者的交互效应对容器内上层、下层基质 EC 值的影响均达到显著水平( $P < 0.05$ )(未列方差分析结果)。上方喷灌的下层基质 EC 值、底部渗灌的上层、下层基质 EC 值均随施肥量的增加而增大,且底部渗灌

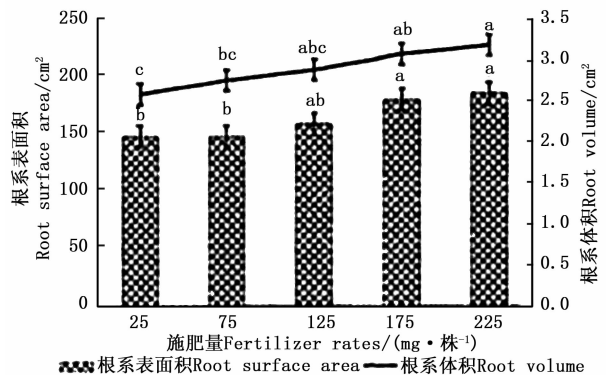


图4 施肥量对根系表面积、根系体积

Fig.4 Effect of fertilizer rates on root surface area and rot volume

的上层、下层基质 EC 值显著高于上方喷灌。225-S 处理的上层、下层基质 EC 值均最大,且明显高于其他处理组合,分别为 4.69、0.56 dS · m<sup>-1</sup>(图5)。

### 3.4 施肥量和灌溉方式对栓皮栎容器苗造林效果的影响

双因素方差分析结果表明,施肥量和灌溉方式

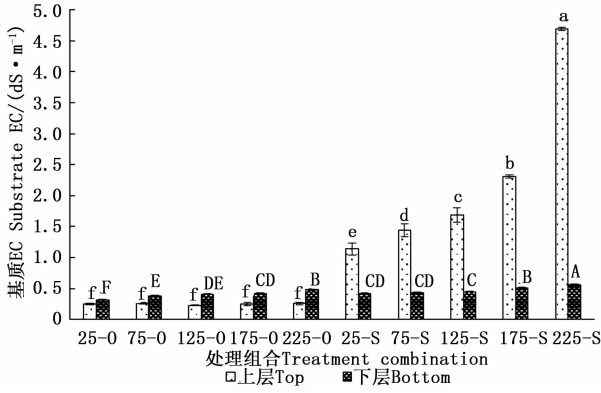


图5 施肥量和灌溉方式交互效应对上层(3 cm)、下层(30 cm)基质 EC 值的影响

Fig. 5 Interaction effect of fertilizer rates and irrigation method on section (top 3 cm, bottom 30 cm) medium EC

二者对造林成活率、幼树树高和地径的影响不存在交互效应。单独施肥或灌溉方式对栓皮栎容器苗第1年、第2年的造林成活率影响不显著;施肥量对造林第1年、第2年的幼树树高和地径均影响显著( $P < 0.05$ ),灌溉方式仅对造林第1年的幼树树高和地径影响显著( $P < 0.05$ ) (未列方差分析结果)。从图6可看出:造林后树高、地径均随施肥量的增加呈增大趋势,且在施肥量  $225 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$  时达最大,造林第1年和第2年的树高、地径比造林初期分别增加了  $4.0 \sim 7.6 \text{ cm}$ 、 $0.82 \sim 1.75 \text{ mm}$  和  $26.4 \sim 38.5 \text{ cm}$ 、 $6.79 \sim 8.93 \text{ mm}$ 。造林第2年,施肥量 125、175、225  $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$  间的树高和地径差异不显著。底部渗灌的栓皮栎容器苗造林第1年的树高、地径比上方喷灌分别显著提高了 4.6% 和 5.0%,造林第2年的树高、地径生长速度高于第1年,但2种灌溉方式间差异不显著(图7)。

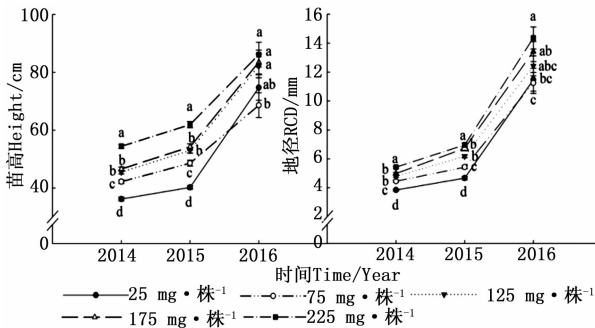


图6 不同施肥量对栓皮栎容器苗苗期(2014)、造林第1年(2015)、第2年(2016)树高和地径的影响

Fig. 6 Effect of fertilizer rate on height and RCD of seedlings in the nursery and field 1 and 2 years

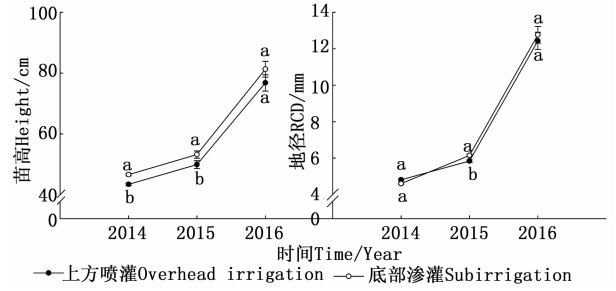


图7 不同灌溉方式对栓皮栎容器苗苗期(2014)、造林第1年(2015)、第2年(2016)树高和地径的影响

Fig. 7 Effect of irrigation method on height and RCD of seedlings in the nursery and field 1 and 2 years

### 4 讨论

以往研究表明,苗木的形态指标随着施肥量的增加而增大<sup>[30]</sup>。本研究中,2种灌溉方式下,苗高、地径和茎生物量随施肥量的增加而增大;225-O 的地径、根和单株生物量最大,225-S 的苗高、茎生物量、茎根比最大;当施肥量大于  $125 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$  时,底部渗灌处理的根、单株生物量开始下降,说明底部渗灌下  $125 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$  施肥量已经满足栓皮栎容器苗的生长所需;225-O 与 125-O、175-O、125-S、175-S 间的根生物量差异不显著,225-O 与 175-O、125-S 间的单株生物量差异不显著,说明上方喷灌下  $175 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$  施肥量才能满足苗木生长所需。所以,选择施肥量  $125 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 、底部渗灌组合既可以保证苗木质量又能减少施肥量,降低生产成本,而且底部渗灌有利于减少水肥流失<sup>[22]</sup>,防止环境污染。

营养状况是苗木质量的重要指标,它影响苗木生长、养分存储及耐胁迫能力<sup>[8]</sup>。根据苗木营养理论,苗木养分状况可分为贫养、奢养和毒害3个阶段。贫养阶段苗木生物量、养分含量、养分浓度都随施肥量的增加而增加;奢养为形态特征没有显著变化,而养分含量和养分浓度继续上升;毒害则是生物量和养分含量均显著下降,养分浓度继续升高<sup>[31]</sup>。本研究结果显示,各器官的养分浓度、含量均随施肥量的增加而增大,这与 Villar-Salvador 等<sup>[7]</sup>、Oliet 等<sup>[6]</sup>、王艺等<sup>[20]</sup>对冬青栎(*Quercus ilex* L.)、地中海松(*Pinus halepensis* Mill.)、浙江楠(*Phoebe chekiangensis* C. B. Shang)和闽楠(*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang)等的研究结果一致;当施肥量大于  $125 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$  时,上方喷灌苗木的生物量、养分浓度和养分含量大都处于增大状态,说明苗木养分尚处于贫养状态;而底部渗灌苗木的根、单株生物量开始减小,但

差异不显著,说明苗木养分进入奢侈状态。

底部渗灌易引起可溶性盐分在基质上层积累<sup>[26, 32-33]</sup>,较高的盐分积累可降低叶片水势,抑制根系养分的吸收和生长,甚至对根系产生毒害作用<sup>[30]</sup>。一般,容器苗的最佳基质 EC 值是  $2.0 \sim 3.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ <sup>[32]</sup>。Jacobs 等<sup>[34]</sup>发现,针叶树容器苗能忍受的最大 EC 值为  $2.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ;但 Bumgarner 等<sup>[32]</sup>研究发现,北美红栎(*Quercus rubra* L.)在基质 EC 值大于  $5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时仍不受影响。本研究中,增加施肥量促进根系表面积、体积及容器内上层、下层基质 EC 值的增大,当施肥量大于  $125 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,根系表面积和体积不再发生明显变化;上方喷灌的下层基质 EC 值、底部渗灌的上层和下层 EC 值均随施肥量增加而增大,上层、下层基质 EC 值最大分别为  $4.69, 0.56 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ,底部渗灌引起的 EC 值上升没有对栓皮栎容器苗生长造成不利影响。

造林后,苗木的成活和生长由苗木质量和造林地条件共同决定<sup>[35]</sup>。造林初期,由于根系吸收能力较弱,苗木所需养分主要依赖贮存器官养分内转移<sup>[36]</sup>。因此,处于奢侈状态的苗木有较强的抗性和较高成活率<sup>[37]</sup>。本研究发现,造林1年后,底部渗灌培育的幼树树高和地径均大于上方喷灌。以往研究表明,底部渗灌的北美红栎<sup>[32]</sup>、柯阿金合欢<sup>[38]</sup>地径比上方喷灌分别提高了 16% 和 27%,这与 Davis 等<sup>[38]</sup>对柯阿金合欢(*Acacia koa* Gray)的研究结果不同。造林2年后,增加施肥量促进幼树树高和地径的生长,这与 Jackson 等<sup>[39]</sup>对长叶松(*Pinus palustris* Mill.)的研究结果一致。养分含量高的大苗,造林后根系生长快,提高了根系从深层土壤吸收水分的能力<sup>[40]</sup>,有利于造林后苗木生长。

## 5 结论

(1)施肥量和灌溉方式交互效应对栓皮栎容器苗形态指标影响显著,底部渗灌下  $125 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 施肥量已能满足栓皮栎容器苗生长,苗木养分积累达到奢侈状态,对第2年的造林效果仍存在促进作用。

(2)底部渗灌促进苗木体内养分积累及造林第1年幼树树高、地径生长。

(3)底部渗灌上层、下层基质 EC 值最大分别是  $4.69, 0.56 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ,并没对苗木生长产生毒害作用。

综合考虑苗期生长形态指标、养分状态、根系参数及造林效果对施肥量和灌溉方式的响应,栓皮栎

容器苗培育可采用底部渗灌和控释肥组合,施肥量为  $125 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (以 N 元素含量为基准)。

## 参考文献:

- [1] Dey D C, Jacobs D F, McNabb K, et al. Artificial regeneration of major oak (*Quercus*) species in the eastern United State-A review of three literature[J]. Forest Science, 2008, 54(1): 77-106.
- [2] 祝燕,李国雷,刘勇,等. 林木容器育苗底部渗灌技术研究现状与展望[J]. 世界林业研究,2013,26(5):47-52.
- [3] 刘勇. 苗木质量调控理论与技术[M]. 北京:中国林业出版社,1999.
- [4] Wilson E R, Vitols K C, Park A. Root characteristics and growth potential of container and bare-root seedlings of red oak (*Quercus rubra* L.) in Ontario, Canada[J]. New Forests, 2007, 34(2): 163-176.
- [5] Crunkilton D D, Pallardy S G, Garrett H E. Water relations and gas exchange of northern red oak seedlings planted in a central Missouri clearcut and shelterwood[J]. Forest Ecology and Management, 1992, 53(1-4): 117-129.
- [6] Oliet J A, Planeels R, Artero F, et al. Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: relative influence of seedling morphology and mineral nutrition[J]. New Forests, 2009, 37(3): 313-331.
- [7] Villar-Salvador P, Planelles R, Enriquez E, et al. Nursery cultivation regimes, plant functional attributes, and field performance relationships in the Mediterranean oak *Quercus ilex* L. [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 196(2): 257-266.
- [8] Landis T D. Mineral nutrition as an index of seedling quality[M]// Duryea M L. Evaluating Seedling Quality: Principles, Procedures, and Predictive Abilities of Major Tests. Corvallis: Oregon State University, 1985:29-48.
- [9] Donald D G M. Nursery fertilization of conifer planting stock[M]// van den Driessche R. Mineral Nutrition of Conifer Seedlings. Boca Raton (Florida): CRS press, 1991: 135-168.
- [10] Goertz H M. Controlled release technology[M]// Howe-Grant M. Encyclopedia of Chemical Technology. New York: John Wiley & Sons Inc, 1993: 254-274.
- [11] Schott K M, Snively A E K, Landhauser S M, et al. Nutrient loaded seedlings reduce the need for field fertilization and vegetation management on boreal forest reclamation sites[J]. New Forests, 2016, 47(3): 393-410.
- [12] Haase D L, Rose R, Trobaugh J. Field performance of three stock sizes of Douglas-fir container seedlings grown with slow-release fertilizer in the nursery growing medium[J]. New Forests, 2006, 31(1): 1-24.
- [13] Haase D L and Rose R. Symposium proceedings: Forest Seedling Nutrition from Nursery to Field[M]. Corvallis: Oregon State University, 1997: 166.
- [14] Jacobs D F, Rose R, Haase D L. Development of Douglas-fir seedling root architecture in response to localized nutrient supply[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(1): 118-125.

- [15] Juntunen M L, Hammar T, Rikala R. Nitrogen and phosphorus leaching and uptake by container birch seedlings (*Betula pendula* Roth) grown in three different fertilizations [J]. *New Forests*, 2003, 25(2): 133–147.
- [16] 马 松, 许自成, 苏永士, 等. 控释肥养分控释特性及其应用研究进展[J]. *江西农业学报*, 2010, 22(4): 69–72.
- [17] 魏红旭, 徐程扬, 马履一, 等. 缓释肥和有机肥对长白落叶松容器苗养分库构建的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1731–1736.
- [18] 祝 燕, 马履一, 刘 勇, 等. 控释氮肥对长白落叶松苗木生长的影响[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(1): 24–28.
- [19] 付妍琳. 控释肥释放模式和施肥量对不同苗龄油松苗木质量的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [20] 王 艺, 王秀花, 吴小林, 等. 缓释肥加载对浙江楠和闽楠容器苗生长和养分库构建的影响[J]. *林业科学*, 2013, 49(12): 57–63.
- [21] 肖 遥, 楚秀丽, 王秀花, 等. 缓释肥加载对 3 种珍贵树种大规格容器苗生长和 N、P 库构建的影响[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(6): 781–787.
- [22] Dumroese K R, Jacobs D F, Davis A S, *et al.* An introduction to subirrigation in forest and conservation nurseries and some preliminary results of demonstrations [C]// Riley L E, Dumroese R K, Landis T D. *National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2006*. Fort Collins, CO: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. *Proc. RMRS-P-50*, 2007: 20–26.
- [23] 罗伟祥, 张文辉, 黄一钊, 等. *中国栓皮栎* [M]. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [24] 杨自立. 栓皮栎播种苗水氮需求规律研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [25] 毛海颖. 栓皮栎需水规律及灌溉制度的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [26] 陈 闯, 刘 勇, 李国雷, 等. 底部渗灌灌水梯度对栓皮栎容器苗生长和养分状况的影响 [J]. *林业科学*, 2015, 51(7): 21–27.
- [27] 李国雷, 祝 燕, 蒋 乐, 等. 指数施肥对栓皮栎容器苗生长和氮积累的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(11): 6–9.
- [28] Dumroese R K, Montville M E, Pinto J R. Using container weights to determine irrigation needs: a simple method [J]. *Native Plants Journal*, 2015, 16(1): 67–71.
- [29] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [30] Bumgarner M L, Salifu K F, Mickelbart M V, *et al.* Effects of fertilization on media chemistry and *Quercus rubra* seedling development under subirrigation [J]. *HortScience*, 2015, 50(3): 454–460.
- [31] Salifu K F and Timmer V R. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(7): 1287–1294.
- [32] Bumgarner M L, Salifu K F, Jacobs D F. Subirrigation of *Quercus rubra* seedlings: nursery stock quality, media chemistry, and early field performance [J]. *HortScience*, 2008, 43(7): 2179–2185.
- [33] Davis A S, Jacobs D F, Overton R P, *et al.* Influence of irrigation method and container type on northern red oak seedling growth and media electrical conductivity [J]. *Native Plants Journal*, 2008, 9(1): 4–13.
- [34] Jacobs D F, Timmer V R. Fertilizer induced changes in rhizosphere electrical conductivity: relation to forest tree seedling root system growth and function [J]. *New Forest*, 2005, 30(2–3): 147–166.
- [35] Villar-Salvador P, Penuelas J L, Nicolas-Peragon J L, *et al.* Is nitrogen fertilization in the nursery a suitable tool for enhancing the performance of Mediterranean oak plantations [J]. *New Forests*, 2013, 44(5): 733–751.
- [36] Oliet J A, Salazar J M, Villar R, *et al.* Fall fertilization of Holm oak affects N and P dynamics, root growth potential, and post-planting phenology and growth [J]. *Annals of forest science*, 2011, 68(3): 647–656.
- [37] van den Driessche R. Changes in drought resistance and root growth capacity of container seedlings in response to nursery drought, nitrogen, and potassium treatments [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, 22(5): 740–749.
- [38] Davis A S, Pinto J R, Jacobs D F. Early field performance of *Acacia koa* seedlings grown under subirrigation and overhead irrigation [J]. *Native Plants Journal*, 2011b, 12(2): 94–99.
- [39] Jackson D P, Dumroese R K, Barnett J P, *et al.* Container longleaf pine seedling morphology in response to varying rates of nitrogen fertilization in the nursery and subsequent growth after outplanting [C]// Riley L E, Dumroese R K, Landis T D. *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2006*. Fort Collins, CO: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. *Proc. RMRS-P-50*, 2007: 114–119.
- [40] Oliet J A, Puértolas J, Planelles R, *et al.* Nutrient loading of forest tree seedlings to promote stress resistance and field performance: a Mediterranean perspective [J]. *New Forests*, 2013, 44(5): 649–669.

(责任编辑: 徐玉秀)