

底部渗灌下容器类型及规格对油松根系结构的影响

滕 飞, 刘 勇, 王 琰, 胡嘉伟, 孙巧玉, 万芳芳, 张 劲

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

摘要: 探索底部渗灌条件下最适合油松 *Pinus tabuliformis* 容器苗生长的容器类型及规格, 对容器苗底部渗灌技术应用的可行性提供理论依据, 完善油松容器苗的培育技术。试验采用嵌套式试验设计, 以油松播种容器苗为研究对象, 在底部渗灌条件下, 设置硬塑料容器(HPC), 无纺布容器(NWC)和黑色塑料容器(BPC)等3种容器类型各2种规格, 通过对油松苗根系主根长、生物量、径级分布等形态指标以及不同容器耗水规律指标的测定, 探讨不同容器类型及规格对苗木根系形态结构的影响。研究表明: 底部渗灌条件下, 利用硬塑料容器培育的油松苗主根长为15.56 cm, 而黑色塑料为23.93 cm, 远超容器长度, 造成窝根现象严重; 硬塑料容器(0.15 g)和黑色塑料容器(0.17 g)苗木的主根干质量无显著差异, 但均显著大于无纺布容器(0.13 g, $P<0.05$); 硬塑料容器下苗木细根(0.00 mm< D <0.50 mm)发育最好, 其根系累计长度、根累计表面积和根累计体积分别占比为71%, 52%和29%, 且长规格硬塑料容器明显促进细根的生长; 硬塑料容器最有利于根部氮磷钾的积累。同时, 底部渗灌期间, 硬塑料容器耗水量最少, 仅为391.95 mL·株⁻¹。综上所述, 底部渗灌条件下, 长规格硬塑料容器(3.80 cm×21.00 cm)最有利于油松播种苗根系的生长, 细根更发达, 有利于苗木对养分的吸收, 对今后提高造林成活率有明显优势。图4表6参27

关键词: 森林培育学; 底部渗灌; 容器类型; 容器规格; 油松; 根系

中图分类号: S723.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2017)03-0449-10

Sub-irrigation with different container types and sizes for containerized root growth of *Pinus tabuliformis* seedlings

TENG Fei, LIU Yong, WANG Yan, HU Jiawei, SUN Qiaoyu, WAN Fangfang, ZHANG Jin

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

Abstract: An experiment was conducted to study the effect of sub-irrigation with different container types and sizes on root morphology and physiological indexes as well as water-use efficiency for containerized *Pinus tabuliformis* seedlings. A nested experimental design with treatments of two sizes of hard plastic containers (3.8 cm×14.0 cm and 3.8 cm×14.0 cm), two sizes of non-woven fabric containers (4.5 cm×10.0 cm and 4.5 cm×15.0 cm), and two sizes of black plastic containers (10.0 cm×10.0 cm and 10.0 cm×15.0 cm) was conducted. Results showed that different container types were significantly different for various indexes of seedling roots ($P<0.05$) and the influence of root mass quality ($P<0.05$). The taproot length of containerized *P. tabuliformis* seedlings cultivated in the hard plastic container was 15.56 cm; whereas, the black plastic container was 23.93 cm, which was 1.5 times of the length of the long container. The taproot dry weights for hard plastic containers (0.15 g) and black plastic containers (0.17 g) were not significantly different ($P<0.05$), but both were significantly greater ($P<0.05$) than the non-woven containers (0.13 g). The proportion of fine roots cultivated by hard long plastic containers was 71% (length), 52% (surface area), and 29% (volume), respectively. The

收稿日期: 2016-05-30; 修回日期: 2016-08-15

基金项目: 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(“948”计划)项目(2012-4-66)

作者简介: 滕飞, 从事容器苗培育技术与理论研究。E-mail: 825501552@qq.com。通信作者: 刘勇, 教授, 博士生导师, 从事种苗培育理论与技术研究。E-mail: lyong@bjfu.edu.cn

hard plastic containers were significantly higher ($P < 0.05$) than the other two types of containers for accumulation of root nitrogen, phosphorus, and potassium (NPK). Meanwhile, water consumption of hard plastic containers was only 391.95 mL per plant. In summary, sub-irrigation with long, hard plastic containers (3.80 cm × 21.00 cm), having more developed fine roots that could absorb nutrients, was most conducive for containerized *P. tabuliformis* seedlings, and thereby could improve survival. [Ch, 4 fig. 6 tab. 27 ref.]

Key words: silviculture; sub-irrigation; container type; container size; *Pinus tabuliformis*; root system

随着水资源危机的加剧,节水理念贯穿于中国各行业,而林业容器育苗常见的上方灌溉使得水资源浪费高达72%^[1],同时未经苗木利用的养分随排水流失,极易造成环境污染^[2]。容器苗底部渗灌技术是利用育苗基质的毛细管作用从容器下方吸收水分对苗木进行灌溉的育苗技术^[3],可实现水分的循环利用。研究发现,在保证苗木质量的前提下,底部渗灌较上方灌溉可节水49%~72%,节肥32%~60%^[4],具有广阔的发展前景。目前,国内外对容器苗底部渗灌技术的研究主要涉及底部渗灌对节水节肥、苗木生长、光合特性、水分利用效率等方面的影响^[5],而对苗木根系以及根团质量的研究较少。根系作为植物吸收水分和养分并进行物质合成的主要途径和重要功能器官,是植物与土壤的动态界面^[6-7],其发育好坏直接影响苗木利用水分及养分的能力,进而决定苗木质量^[8-9]。容器作为根系的主要生存空间,直接影响苗木的生长发育,且不同的苗木因生物学特性的差异所适合的容器也不同^[10]。国外关于底部渗灌下容器选择的研究发现,容器的结构等特性会影响水分向上运动的速度和距离,从而影响底部渗灌的效果^[11]。中国对容器苗底部渗灌技术的研究仅在栓皮栎 *Quercus variabilis*^[12-13]和 华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*^[14-15]水肥调控技术上取得了一些进展,而关于容器选择的研究还未见报道,因此,研究不同容器类型及规格对底部渗灌下容器苗根系质量的影响具有重要意义。本研究以油松 *Pinus tabuliformis* 播种容器苗为研究对象,探讨底部渗灌条件下不同容器类型及规格对苗木根系质量的影响,旨在找出既适合底部渗灌技术,又适合油松苗木培育的最佳容器,为底部渗灌技术在中国造林树种容器育苗中的应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地设在北京林业大学妙峰山教学试验林场的森林培育学科普照院科研基地全自动透光温室内(39°54'N, 116°28'E)。育苗阶段温室采用自然光照,平均温度为28.6℃,最高温度为35.0℃,最低温度为25.9℃,平均湿度为75%,灌溉采用底部渗灌循环用水。

1.2 试验材料

油松种子采收于河北省承德市北京林业大学北方基地,千粒质量为40.00g。育苗基质是V(泥炭):V(珍珠岩)=3:1,泥炭为丹麦品氏托普公司生产的5号泥炭。试验所用肥料为大汉农业科技有限公司生产的包裹型缓释复合肥[V(N):V(P):V(K)=14:13:13],肥效5~6个月。

1.3 试验设计

试验设置3种容器类型(硬塑料、无纺布、黑色塑料),每种容器类型下又设置2种容器规格(短规格、长规格),构成3×2嵌套设计,共6个处理,重复5次·处理⁻¹,1托盘·重复⁻¹,育苗45株·托盘⁻¹,具体处理见表1。硬塑料容器是内壁有4条导根肋,底部有4个排水口的锥形物理修根容器,进口自Stuewe & Sons公司。无纺布容器属于空气修根容器,购买于安庆林兴育苗有限公司。黑色塑料容器购买于北京首创科技有限公司的育苗营养杯。

1.4 育苗方法

1.4.1 种子处理与播种 油松种子采收后经过除杂、挑选、阴干,放入0~2℃的冷柜中储藏,之后于2014年4月15日进行种子催芽。油松种子催芽前,用质量分数为0.5%的高锰酸钾水溶液浸泡2.0h

表1 不同容器类型及规格的试验处理

Table 1 Treatments of different container types and sizes

容器类型	容器规格	口径 cm×长度 cm	容积/cm ³
硬塑料	短规格	3.8×14.0	115
	长规格	3.8×21.0	164
无纺布	短规格	4.5×10.0	159
	长规格	4.5×15.0	238
黑色塑料	短规格	10.0×10.0	785
	长规格	10.0×15.0	1 178

后，用清水洗净，然后将种子放在 40~50 °C 的温水中，自然冷却 1 昼夜后捞出，然后按 1:3 的比例与湿沙混合均匀，放入温室中催芽，当有 30% 裂嘴露白即可进行播种。2014 年 4 月 17 日，将油松容器苗按照试验设计的育苗株数及施氮量 100.00 mg·株⁻¹ 计算出每种容器类型及规格所需的缓释肥量，然后将缓释肥一次性拌入基质中并混合均匀，再将混合了缓释肥的基质装入容器内，装填时不需压太紧，墩实即可，之后将容器置于育苗床上，在播种前浇水至饱和。4 月 19 日播种，播种数为 1~2 粒·容器⁻¹，播种深度均为种子直径的 2~3 倍。

1.4.2 苗期管理 播种后为保证上层基质湿润，采用上方灌溉进行少量多次浇水。幼苗出齐后进行间苗，并继续采用上方灌溉适量灌水，大约 2 次·d⁻¹。幼苗期结束后至抗冻锻炼前，对苗木进行底部渗灌。本试验模拟底部渗灌系统，使用自购的带盖整理箱作为渗水槽，隔 2 d 对育苗托盘称量 1 次，所用天平精度为 0.10 g，当所称量达到灌水参数时，将托盘置于整理箱中渗水至饱和，之后将托盘置于整理箱上方进行控水，大约 15 min 后将托盘移至苗床上，试验过程中定期补充整理箱中的水。灌水参数的计算方法如下：首先，在灌水前将容器、基质和托盘的总质量记为 W_1 ，之后采用上部灌溉使容器内基质达到饱和^[16]，称取此时托盘、容器和基质的总质量，记为 W_2 ，则基质饱和水质量 $W=W_2-W_1$ 。因设定速生期灌水参数为饱和水质量的 75%~80%，硬化期灌水参数为饱和水质量的 55%~60%^[17]，则速生期的灌水临界质量为 75% $W+W_1$ 至 80% $W+W_1$ ，硬化期的灌水临界质量为 55% $W+W_1$ 至 60% $W+W_1$ 。

1.5 取样与测定

1.5.1 底部渗灌期间每月灌水测定 在底部渗灌期间(2014 年 6~9 月)，隔 2 d 对各育苗托盘的质量进行监测，当质量达到底部渗灌灌水参数时，即对其进行底部渗灌至饱和。在渗灌前，记录下各育苗托盘所称得的质量数据，计算每次渗水量。

1.5.2 苗木取样与测定 2014 年 10 月 20 日，将苗木搬出温室进行抗冻训练。11 月 15 日，对油松苗进行破坏取样，取 8 株·处理⁻¹·重复⁻¹，将容器苗根系用清水洗净后小心装入自封袋，再置于冰盒中，当天即带回实验室。将根系样品带回实验室后先测定主根长，之后用 Epson V750 Pro 数字化扫描仪扫描，用 Win RHIZO 根系图像分析系统软件定量分析根系扫描图像的形态指标，主要包括根系长度、根系表面积、根系体积等指标，比根长为根系总根长与根生物量之比^[18]。根系分级方法为 0.00 mm < 根系直径 (D) ≤ 0.20 mm 为第 1 径级，0.20 mm < D ≤ 0.50 mm 为第 2 径级，0.50 mm < D ≤ 1.00 mm 为第 3 径级，1.00 mm < D ≤ 2.00 mm 为第 4 径级， D > 2.00 mm 为第 5 径级^[15]。之后将根系从距地径 5.00 cm 处分开，定义 5.00 cm 以上为上层根系(N_1)，5.00 cm 以下为下层根系(N_2)，统计完根系上层和下层的一级侧根数量后将上层和下层的侧根剪下，分别混合 8 株·重复⁻¹ 苗木的主根、上层侧根及下层侧根，在 105 °C 的烘箱中杀青 20 min，70 °C 烘干至质量恒定后称量各部分生物量。

1.6 数据分析

用 Excel 2010 整理数据，用 SPSS 20.0 软件中的嵌套模型对 3×2 嵌套设计的试验数据进行方差分析，用最小显著性差异法(LSD)对数据进行多重比较，用 Excel 2010 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同容器类型及规格对油松苗主根长、一级侧根数的影响

由表 2 可知：3 种容器类型主根长之间差异显著($P < 0.05$)，黑色塑料容器主根长均值最大，为 23.93 cm，明显超出容器长度(短规格为 10.00 cm，长规格为 15.00 cm)，其他 2 种容器类型主根长均没有超出容器长度。3 种容器类型一级侧根总数无明显差异($P > 0.05$)，5.00 cm 以下一级侧根数(N_2)均多于 5.00 cm 以上一级侧根数(N_1)。黑色塑料容器 N_1 值明显少于其他 2 种容器类型，仅为 7.30。不同容器类型 N_1/N_2 值差异显著($P < 0.05$)，表现为无纺布 > 硬塑料 > 黑色塑料，无纺布容器值为 1.12，上下层一级侧根数基本均衡；硬塑料容器值为 0.75，上层一级侧根略少于下层；而黑色塑料容器值为 0.50，上层一级侧根数几乎仅为下层的一半。

对于容器规格而言，硬塑料长规格容器促进了主根的伸长，较短规格多出 7.36 cm，无纺布容器的规格对主根长无明显影响，黑色塑料容器短规格主根长为 30.76 cm，远远超出容器长度，长规格仅为 17.10 cm，略超出容器长度；硬塑料和无纺布容器的长规格均促进了一级侧根数和 N_2 的增多，长规格

表2 容器类型及规格对油松主根长、一级侧根数及上下层一级侧根数的影响

Table 2 Seedlings taproot length, the number of primary lateral roots and primary lateral roots from the root plug in each of the two root plug depths in response to container types and sizes

容器类型	容器长度/cm	主根长/cm	一级侧根数/条	N_1 /条	N_2 /条	N_1/N_2
硬塑料	14.0	11.88 ± 0.47 Bb	20.60 ± 4.28 Ab	10.00 ± 1.58 Aa	10.80 ± 2.86 Ab	0.93 ± 0.23 Ba
	21.0	19.24 ± 0.76 Ba	26.00 ± 3.32 Aa	9.40 ± 1.14 Aa	16.80 ± 2.95 Aa	0.57 ± 0.11 Bb
无纺布	10.0	8.12 ± 0.16 Ca	18.20 ± 2.28 Ab	10.60 ± 0.89 Aa	7.80 ± 1.64 Bb	1.46 ± 0.47 Aa
	15.0	12.56 ± 0.68 Ca	25.00 ± 2.83 Aa	10.60 ± 2.97 Aa	14.20 ± 2.28 Ba	0.77 ± 0.27 Ab
黑色塑料	10.0	30.76 ± 11.16 Aa	21.40 ± 3.65 Aa	7.40 ± 1.14 Ba	14.40 ± 2.97 Aa	0.52 ± 0.08 Ca
	15.0	17.10 ± 3.28 Ab	22.20 ± 4.09 Aa	7.20 ± 1.10 Ba	15.20 ± 3.11 Aa	0.48 ± 0.05 Ca

说明： N_1 为距地径5.00 cm处以上根系的一级侧根数； N_2 距地径5.00 cm处以下根系的一级侧根数； N_1/N_2 为上下层一级侧根数的比值。不同大写字母表示不同容器类型之间差异显著($P < 0.05$)，不同小写字母表示同种容器类型不同规格之间差异显著($P < 0.05$)。

硬塑料和无纺布容器的一级侧根数分别比短规格多出30%和39%，而黑色塑料容器一级侧根数、 N_1 以及 N_2 均未受到容器规格的影响。

2.2 不同容器类型及规格对油松苗全株以及根部生物量的影响

多重比较结果显示(表3)：3种容器类型下单株生物量与根生物量呈现相似规律，硬塑料和黑色塑料容器无显著差异，但均明显大于无纺布容器($P < 0.05$)。而侧根干质量、上层侧根干质量(G_1)及下层侧根干质量(G_2)3种容器类型之间均差异显著($P < 0.05$)，呈现出黑色塑料>硬塑料>无纺布的规律，黑色塑料容器侧根干质量、上层侧根干质量、下层侧根干质量分别是硬塑料的1.56倍、1.50倍和1.67倍，无纺布的2.79倍、2.67倍和3.00倍。从 G_1/G_2 值可以看出，3种容器类型之间无显著差异($P > 0.05$)，上层侧根干物质积累均约为下层的2.00倍。

由表3可知：对于硬塑料容器来说，长规格容器显著促进了苗木整株以及根部的生长，单株干质量、主根干质量、侧根干质量及下层侧根干质量分别比短规格多出0.24、0.04、0.07和0.05 g。对于无纺布容器而言，长规格容器对单株、主根和下层侧根的积累促进作用较明显。而在黑色塑料容器中，长规格容器显著促进了单株、侧根干质量的增多，单株干质量较短规格多出0.64 g。

表3 容器类型及规格对油松总生物量以及根生物量的影响

Table 3 Seedling total biomass and root biomass in response to container types and sizes

容器类型	容器长度/cm	单株干质量/ (g·株 ⁻¹)	主根干质量/ (g·株 ⁻¹)	侧根干质量/ (g·株 ⁻¹)	G_1 /(g·株 ⁻¹)	G_2 /(g·株 ⁻¹)	G_1/G_2
硬塑料	14.0	1.42 ± 0.12 Ab	0.13 ± 0.01 Ab	0.22 ± 0.02 Bb	0.15 ± 0.02 Ba	0.06 ± 0.01 Bb	2.52 ± 0.46 Aa
	21.0	1.66 ± 0.11 Aa	0.17 ± 0.03 Aa	0.29 ± 0.03 Ba	0.18 ± 0.04 Ba	0.11 ± 0.02 Ba	1.62 ± 0.66 Ab
无纺布	10.0	1.05 ± 0.12 Bb	0.10 ± 0.01 Bb	0.13 ± 0.02 Ca	0.10 ± 0.02 Ca	0.03 ± 0.01 Cb	3.58 ± 0.91 Aa
	15.0	1.29 ± 0.17 Ba	0.16 ± 0.02 Ba	0.16 ± 0.01 Ca	0.09 ± 0.01 Ca	0.07 ± 0.01 Ca	1.26 ± 0.11 Ab
黑色塑料	10.0	1.28 ± 0.09 Ab	0.15 ± 0.02 Aa	0.31 ± 0.04 Ab	0.22 ± 0.02 Ab	0.09 ± 0.02 Ab	2.59 ± 0.56 Aa
	15.0	1.92 ± 0.22 Aa	0.18 ± 0.03 Aa	0.48 ± 0.05 Aa	0.26 ± 0.04 Aa	0.22 ± 0.04 Aa	1.23 ± 0.31 Ab

说明： G_1 为距地径5.00 cm处以上根系的侧根干质量； G_2 距地径5.00 cm处以下根系的侧根干质量； G_1/G_2 为上下层侧根干质量的比值。不同大写字母表示不同容器类型之间差异显著($P < 0.05$)，不同小写字母表示同种容器类型不同规格之间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 不同容器类型及规格对油松苗根总长、根表面积、根体积及比根长的影响

由多重比较结果可知(表4)：硬塑料与黑色塑料容器各指标之间均无显著差异，但均显著大于无纺布容器($P < 0.05$)。黑色塑料容器苗木根总长、根表面积和根体积的数值最大，为616.72 cm，98.11 cm²和1.25 cm³，分别是无纺布容器的3.28、2.91和2.60倍。硬塑料容器比根长数值最大，为1435.97 cm·g⁻¹，约为无纺布容器的2.11倍。对于硬塑料和黑色塑料容器来说，长规格均明显促进了根总长、根表面积和根体积的增加。长规格的硬塑料容器苗木根总长、根表面积和根体积分别比短规格高出约52%、46%和44%。长规格黑色塑料容器苗木根总长、根表面积和根体积分别较短规格高出50%、49%和40%。然而，容器规格并没有影响无纺布容器中苗木的根总长、根表面积和根体积。在3种容器类型

表 4 容器类型及规格对油松根总长、根表面积、根体积及比根长的影响

Table 4 Seedlings root length, root surface, root volume and SRL in response to container types and sizes

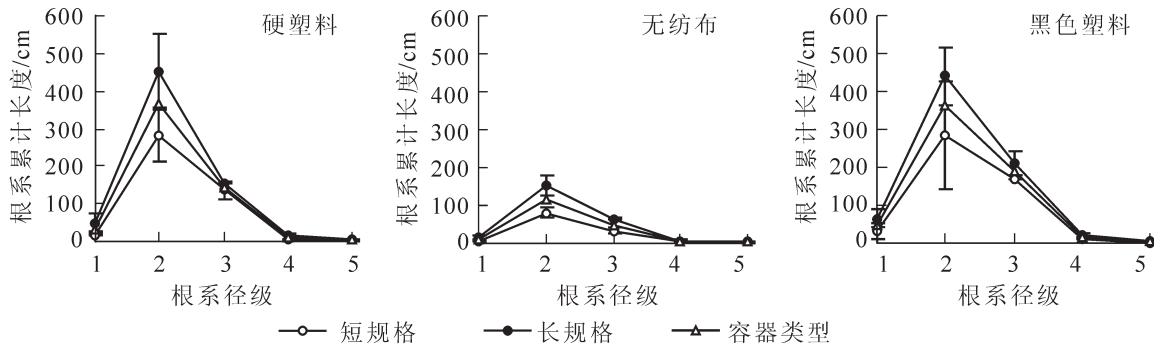
容器类型	容器长度/cm	根总长/cm	根表面积/cm ²	根体积/cm ³	比根长/(cm·g ⁻¹)
硬塑料	14.0	447.25 ± 91.95 Ab	70.58 ± 13.73 Ab	0.89 ± 0.16 Ab	1 324.31 ± 413.41 Aa
	21.0	681.78 ± 125.97 Aa	104.46 ± 15.11 Aa	1.28 ± 0.13 Aa	1 547.63 ± 433.79 Aa
无纺布	10.0	131.36 ± 24.53 Ba	24.89 ± 5.80 Ba	0.37 ± 0.11 Ba	554.83 ± 120.91 Ba
	15.0	244.94 ± 35.38 Ba	42.53 ± 4.96 Ba	0.59 ± 0.05 Ba	806.42 ± 152.51 Ba
黑色塑料	10.0	493.43 ± 163.60 Ab	79.81 ± 18.80 Ab	1.04 ± 0.14 Ab	1 073.90 ± 432.91 Aa
	15.0	740.01 ± 133.38 Aa	116.40 ± 18.19 Aa	1.46 ± 0.19 Aa	1 178.73 ± 292.53 Aa

说明：不同大写字母表示不同容器类型之间差异显著($P < 0.05$)，不同小写字母表示同种容器类型不同规格之间差异显著($P < 0.05$)。

下，容器规格均没有影响苗木比根长的大小。

2.4 不同容器类型及规格对油松苗根系各径级分布的影响

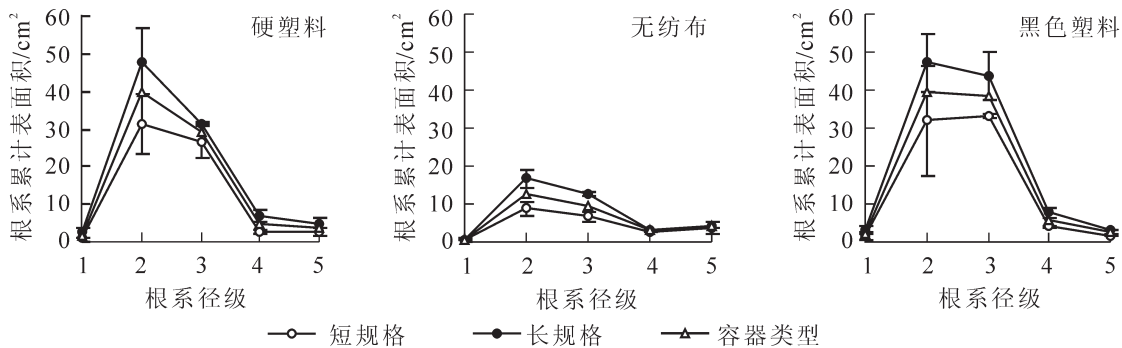
2.4.1 容器类型对苗木各径级累计根长、累计根表面积及累计根体积的影响 多重比较结果可知(图 1, 图 2)：苗木根系累计长度与累计表面积呈现类似变化趋势，随着径级的增加均表现为先增大后减小。不同容器类型下苗木根系累计长度在各径级上差异显著($P < 0.05$)，无纺布容器第 1 径级到第 4 径级累计根长均明显小于其他 2 种容器类型，硬塑料和黑色塑料容器细根(第 1 径级+第 2 径级)累计长度无明显差异，硬塑料容器细根长为 402.32 cm，占总根长比例最大，达 71%，显著高于细根长为 128.23 cm 的无纺布容器。与苗木根系累计长度变化相似，3 种容器类型径级较小的根系累计表面积占较大比例，但第 3 径级所占比例有明显提高。硬塑料容器与黑色塑料容器细根累计表面积均显著大于无纺布容器，硬塑料容器细根所占比例最大(52%)，累计表面积为 41.41 cm²，而无纺布容器细根累计表面积仅为



1~5 分别代表第 1 径级($0 \text{ mm} < D \leq 0.2 \text{ mm}$)，第 2 径级($0.2 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm}$)，第 3 径级($0.5 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$)，第 4 径级($1.0 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$)和第 5 径级($D > 2.0 \text{ mm}$)。

图 1 容器类型及规格对油松根系累计长度的影响

Figure 1 Seedlings root length in response to container types and sizes

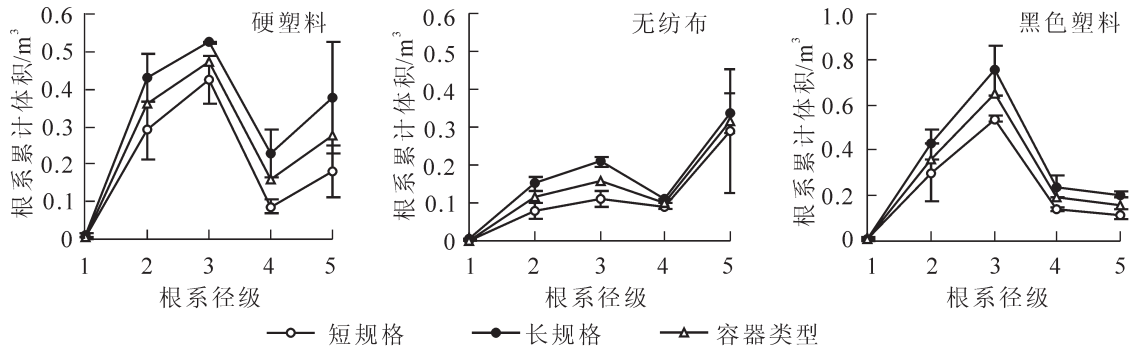


1~5 分别代表第 1 径级($0 \text{ mm} < D \leq 0.2 \text{ mm}$)，第 2 径级($0.2 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm}$)，第 3 径级($0.5 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$)，第 4 径级($1.0 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$)和第 5 径级($D > 2.0 \text{ mm}$)。

图 2 容器类型及规格对油松根系累计表面积的影响

Figure 2 Seedlings root surface in response to container types and sizes

13.22 cm², 占根系总表面积的 44%。与根系累计长度和累计表面积相比, 根系累计体积呈现出不同的变化趋势(图 3), 径级较大的根系累计体积所占比例逐渐增大, 硬塑料和黑色塑料容器第 3 径级根累计体积占根总体积的比例最大, 分别为 37%, 47%。3 种容器类型细根累计体积占总体积的 17%~29%, 其中, 硬塑料容器细根所占比例最大(29%), 累计体积为 0.368 cm³, 仅次于黑色塑料容器的 0.372 cm³, 两者均显著大于无纺布容器的 0.118 cm³($P < 0.05$), 且无纺布容器细根所占比例最低, 仅为 17%。



1~5 分别代表第 1 径级($0 \text{ mm} < D \leq 0.2 \text{ mm}$), 第 2 径级($0.2 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm}$), 第 3 径级($0.5 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$), 第 4 径级($1.0 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$) 和第 5 径级($D > 2.0 \text{ mm}$)。

图 3 容器类型及规格对油松根系累计体积的影响

Figure 3 Seedlings root volume in response to container types and sizes

2.4.2 容器规格对苗木各径级累计根长、累计根表面积及累计根体积的影响 从根系累计长度、表面积以及体积均可以看出(图 1~3), 3 种容器类型下, 与短规格容器相比, 长规格容器均促进了各径级根系的生长。就根系累计长度而言, 长规格硬塑料容器第 1 径级至第 5 径级分别较短规格容器高出 1.72 倍, 60%, 19%, 1.74 倍及 79%, 长规格细根累计长度所占比例(74%)显著高于短规格(67%); 长规格无纺布容器第 1 径级至第 5 径级分别较短规格容器高出 1.21 倍, 89%, 97%, 20% 及 21%。黑色塑料容器的长规格第 1 径级至第 5 径级分别较短规格容器高出 1.12 倍, 56%, 26%, 90% 和 69%, 长规格细根累计长度达 505.93 cm, 显著高于短规格的 313.82 cm。根系累计表面积和累计体积也呈相似变化规律, 长规格容器细根累计表面积为 17.31~50.47 cm², 显著高于短规格细根累计表面积的 9.13~33.32 cm², 同时, 长规格细根累计表面积占总表面积的 46%~54%, 短规格所占比例为 41%~50%; 长规格容器根系累计体积为 0.15~0.44 cm³, 显著高于短规格细根累计体积的 0.08~0.29 cm³。

2.5 不同容器类型及规格对油松苗根部氮、磷、钾积累的影响

2.5.1 不同容器类型及规格对根部养分含量的影响 多重比较结果可知(表 5): 硬塑料容器培育下的油松苗根中氮显著高于无纺布和黑塑料容器($P < 0.05$); 就根中磷含量而言, 硬塑料容器和黑色塑料容器根中磷无显著差异($P > 0.05$), 但均显著大于无纺布容器($P < 0.05$)。3 种容器类型根中钾表现与氮较为一致, 硬塑料容器最大, 为 4.11 mg·株⁻¹, 显著高于无纺布和黑色塑料容器($P < 0.05$), 硬塑料容器较最低的无纺布容器高出约 32%。长规格的黑色塑料容器明显促进了根部氮的增多, 较短规格容器高出约 52%; 无纺布和黑色塑料容器长规格较短规格均有利于根部磷的增加, 无纺布长规格较短规格高出

表 5 容器类型及规格对油松苗木根部氮、磷、钾的影响

Table 5 Contents of N, P, K in the root of *Pinus tabulaeformis* in response to different container types and sizes

容器类型	容器长度/cm	氮/(mg·株 ⁻¹)	磷/(mg·株 ⁻¹)	钾/(mg·株 ⁻¹)
硬塑料	14.0	4.44 ± 0.47 Aa	0.56 ± 0.05 Aa	4.50 ± 0.31 Aa
	21.0	4.39 ± 0.70 Aa	0.56 ± 0.10 Aa	3.71 ± 0.48 Ab
无纺布	10.0	3.03 ± 0.56 Ba	0.35 ± 0.06 Bb	2.79 ± 0.25 Bb
	15.0	3.17 ± 0.50 Ba	0.58 ± 0.10 Ba	3.41 ± 0.48 Ba
黑色塑料	10.0	2.13 ± 0.20 Bb	0.39 ± 0.05 Ab	2.98 ± 0.15 Ba
	15.0	3.23 ± 0.60 Ba	0.69 ± 0.07 Aa	3.49 ± 1.09 Ba

说明: 不同大写字母表示不同容器类型之间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示同种容器类型不同规格之间差异显著($P < 0.05$)。

57%，黑色塑料长规格磷($0.69 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$)比短规格($0.39 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$)高出 77%；短规格硬塑料容器根部钾较长规格高出 22%，无纺布长规格容器根部钾较短规格高出 22%，黑色塑料容器规格的变化对根部钾无显著影响。

2.5.2 不同容器类型及规格对根部养分质量分数的影响 根据苗木的氮、磷、钾质量分数多重比较结果分析可知(表 6)：底部渗灌下各容器类型根部养分差异显著($P < 0.05$)。硬塑料和无纺布容器氮处于较高水平，硬塑料容器磷显著高于无纺布和黑色塑料($P < 0.05$)，3 种容器类型钾表现为黑色塑料 > 硬塑料 > 无纺布，三者之间存在显著差异性。同时，由表 6 可以看出：除无纺布和黑色塑料长规格钾显著低于短规格外，其他长规格与短规格之间无显著差异($P > 0.05$)。

表 6 容器类型规格对油松苗木根部氮、磷、钾养分质量分数的影响

容器类型	容器长度/cm	氮质量分数/%	磷质量分数/%	钾质量分数/%
硬塑料	14.0	1.60 ± 0.08 ABa	0.28 ± 0.05 Aa	0.74 ± 0.04 Ba
	21.0	1.35 ± 0.05 ABa	0.32 ± 0.02 Aa	0.73 ± 0.04 Ba
无纺布	10.0	1.71 ± 0.16 Aa	0.25 ± 0.03 Ba	0.75 ± 0.02 Ca
	15.0	1.94 ± 0.88 Aa	0.17 ± 0.02 Ba	0.62 ± 0.03 Cb
黑色塑料	10.0	1.52 ± 0.43 Ba	0.22 ± 0.03 Ba	0.93 ± 0.07 Aa
	15.0	1.13 ± 0.08 Ba	0.23 ± 0.09 Ba	0.83 ± 0.05 Ab

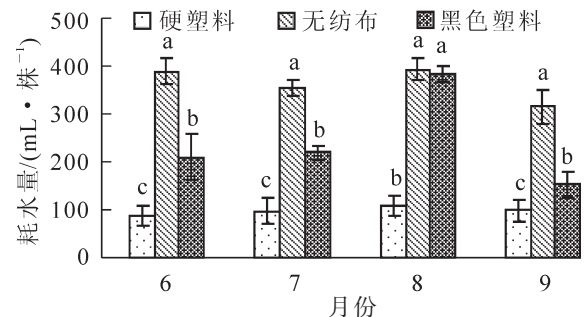
说明：不同大写字母表示不同容器类型之间差异显著($P < 0.05$)，不同小写字母表示同种容器类型不同规格之间差异显著($P < 0.05$)。

2.6 不同容器类型对油松苗底部渗灌下耗水规律的影响

由图 4 可以看出：除 8 月无纺布和黑色塑料无显著差异，但均显著高于硬塑料外，其他各月份 3 种容器类型耗水量均呈现显著差异($P < 0.05$)。各月耗水量呈现出无纺布 > 黑色塑料 > 硬塑料的规律。底部渗灌结束后，无纺布总耗水量最高，达到 $1\ 453.02 \text{ mL} \cdot \text{株}^{-1}$ ，黑色塑料次之，为 $964.47 \text{ mL} \cdot \text{株}^{-1}$ ，而硬塑料耗水量最少，仅为 $391.95 \text{ mL} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

3 讨论

根系是植物吸收水分和养分并进行物质合成的重要功能器官，其发育好坏直接影响苗木利用水分及养分的能力，进而决定苗木质量。底部渗灌是利用育苗基质毛细管作用从容器下方吸收水分对苗木进行灌溉，因此，根系的生长状况是底部渗灌应用的前提。我们的研究表明，黑色塑料容器培育的油松苗出现了严重的窝根现象，主根长 23.93 cm ，明显超出容器长度，不利于造林后苗木的成活^[19]，而具有控根功能的无纺布和硬塑料容器则可很好地促进苗木主根的垂直生长，没有出现窝根现象。无纺布和硬塑料容器中苗木的侧根都出现了上移现象，由 N_1/N_2 值可知，无纺布容器上下层一级侧根数量基本均衡，而黑色塑料容器的侧根则集中在根系下层，下层一级侧根数为上层的 2.00 倍。WENNY 等^[20]和王良桂等^[21]研究也表明，控根容器对根系上移具有很强的促进作用。MARLER 等^[22]还发现空气控根容器能比其他控根容器更明显地促进根系上移，与我们的研究相似。研究发现 3 种容器类型苗木侧根干质量垂直分布特点一致，上层侧根干质量均约为下层的 2.00 倍。由此可见，黑色塑料容器上层一级侧根数量明显少于下层，但上层侧根干物质积累却远远超过下层，主要原因是底部渗灌下容器下层吸水充分，促进了根部的生长，但黑色塑料容器无控根功能，造成了生物量的无效积累。3 种容器类型下，容器规格的增大均明显促进了苗木主根的伸长和下层根系的生长。黑色塑料短规格容器长度为 10.00 cm ，但苗木主根长却超过了 30.00 cm ，窝根现象明显，而长规格容器苗木窝



不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 4 不同容器类型油松容器苗底部渗灌下耗水量差异

Figure 4 Effect of different container types on water consumption of containerized *Pinus tabulaeformis* under subirrigation

根现象得到极大缓解且根系上下层侧根干质量积累均有增加。对于硬塑料和无织物容器来说,容器规格增大在促进主根伸长的基础上,也促进了下层一级侧根数的增多和下层侧根干质量的积累。

根长、根表面积、根体积以及比根长都是反映根系形态的重要指标。一般来说,比根长大的苗木,根系吸收能力强,对基质中养分和水分的利用效率高^[18]。研究结果显示,无纺布容器的各项指标均明显小于其他2种容器类型,黑色塑料容器中苗木根总长、根表面积和根体积的数值分别是无纺布容器的3.28, 2.91和2.60倍,硬塑料容器比根长数值约为无纺布容器的2.11倍,而硬塑料和黑色塑料容器各指标无显著差异,其中硬塑料容器比根长最大,体现了很好的根系吸收能力。无纺布各项指标之所以小,可能是由于其透水透气性好,不利于水分的储存,造成大量水分散失导致的^[23]。对于3种容器类型来说,长规格的硬塑料和黑色塑料容器显著促进了苗木根总长、根表面积和根体积的增加,而长规格的无纺布容器各指标仅略高于短规格容器,因此,与其他2种容器类型相比,改变无纺布容器的规格对苗木根系形态的影响较小。

细根被认为是根系完成基本生理生态功能的主体,是吸收周围环境中养分和水分的主要部分。一般细根所占比例越大,根系吸收能力越强,且大量的须根容易形成根团^[24-25]。PREGITZER等^[26]认为小于0.50 mm的根系为细根最为合理。研究中,第1径级和第2径级($0.00\text{ mm} < D \leq 0.50\text{ mm}$)的根系为细根,其中第2径级根系($0.20\text{ mm} < D < 0.50\text{ mm}$)是细根的主体。底部渗灌条件下3种容器类型第2径级根系累计根长、累计表面积及累计体积呈现相似规律,即硬塑料和黑色塑料容器无明显差异,但均显著高于无纺布容器。黑色塑料容器第3径级根系生长明显优于其他2种容器类型,根累计体积比第2径级高出约85%。可见,黑色塑料容器中占据大多数空间的是第3径级的根系,无纺布容器占据较大空间的是第5径级的根系,这也可以反映出底部渗灌下无纺布容器不利于细根生长。相比之下,硬塑料容器最有利于细根的发育,根系累计长度、根累计表面积、根累计体积分别为71%, 52%和29%。3种容器类型下,与短规格容器相比,长规格容器均显著促进了各径级根系的生长,且对细根的促进作用明显大于粗根(第3, 4, 5径级)。

底部渗灌与上方灌溉相比,可以使未经苗木利用的养分回流至储水箱,避免养分淋溶流失,减少对环境的污染。底部渗灌条件下,3种容器类型养分含量呈现显著差异,硬塑料容器根中的氮磷钾质量分数均显著大于其他2种容器类型,有利于油松苗根团质量的提高,从而促进油松苗根部对养分的吸收与积累,这与DUMROESE等^[4]的研究结果相一致,因此,硬塑料容器对底部渗灌下油松苗根部氮磷钾的积累最有利,而高氮磷钾有利于提高苗木抗性,从而促进苗木后期的生长发育。3种容器类型下,无纺布和黑色塑料容器受容器规格的影响较显著,长规格容器更有利于氮磷钾的积累,而硬塑料容器基本未受到容器规格的影响。底部渗灌下,硬塑料容器根部氮磷钾浓度处于较高水平,且根生物量较高,占苗木全株生物量比例最大,因此,3种容器中硬塑料容器最有利于根部养分的积累,同时,底部渗灌未对不同规格产生显著影响,但长规格苗木根部和全株生物量均显著高于短规格,因此,长规格更有利于苗木根部养分的积累。

底部渗灌作为一个封闭系统,是将未经利用的水分流回储水箱,进而得以回收利用,因此,容器苗底部渗灌最明显的特点就是节水^[4],而不同容器类型对底部渗灌的响应有所不同。研究表明,硬塑料容器耗水量最小,对水分的利用率最高,黑色塑料容器耗水量次之,而无织物容器耗水量最大。这是由于硬塑料和黑色塑料容器具有良好的保水性,而无织物容器通气透水性较好,加快了水分散失速率,在相同的灌水参数下,无纺布容器总是最先需水,致使苗木在生长季灌水频率过高,耗水量也随之增大。有研究发现,过高的灌水频率会增加水分的无效消耗并且大大降低苗木吸收水分和养分的效率^[26-28],这可能就是导致无纺布容器中苗木根系生长不良的主要原因之一,而根系的不良生长又最终影响了苗木整体的生长。

总之,在该试验研究条件下,综合考虑根系生物量、根系长度、细根所占比例以及氮磷钾养分的积累等因素,长规格的硬塑料容器(3.80 cm×21.00 cm)更适合应用于底部渗灌系统下培育油松容器苗,此时能有效保证根系的垂直生长,同时根系上下层生长均衡,根系细根($0.00\text{ mm} < D < 0.50\text{ mm}$)所占比例最大,且更有利于氮磷钾的积累,苗木质量达到最优,耗水量最少,既限制了养分淋溶所造成的环境污染,又实现了水分的循环再利用。

4 参考文献

- [1] DUMROESE R K, WENNY D L, PAGE-DUMROESE D S. Nursery waste water: the problem and possible remedies [C]//LANDIS T D, CREGG B. *Western Forest and Conservation Nursery Association Meeting*. Kearney: RNGR, 1995: 1 – 11.
- [2] DUMROESE R K, PINTO J R, JACOBS D F, *et al.* Subirrigation reduces water use, nitrogen loss, and moss growth in a container nursery [J]. *Nat Plants J*, 2006, **7**(3): 253 – 261.
- [3] 祝燕, 刘勇, 李国雷, 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): 48 – 52.
ZHU Yan, LIU Yong, LI Guolei, *et al.* Current development and prospect on sub-irrigation in container cultivation of forest trees [J]. *World For Res*, 2013, **26**(5): 48 – 52.
- [4] DUMROESE R K, 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*. Fort Collins (CO): USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station Proceedings RMRS-P-50, 2007: 20 – 26.
- [5] DAVIS A S, AGHAI M M, PINTO J R, *et al.* Growth, gas exchange, foliar nitrogen content, and water use of subirrigated and overhead-irrigated *Populus tremuloides* Michx. seedlings [J]. *HortScience*, 2011, **46**(9): 1249 – 1253.
- [6] JACKSON R B, MOONEY H A, SCHULZE E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents [J]. *Proc Nat Acad Sci USA*, 1997, **94**(14): 7362 – 7366.
- [7] GUO Dali, XIA Mengxue, WEI Xing, *et al.* Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species [J]. *New Phytologist*, 2008, **180**(3): 673 – 683.
- [8] 张德健, 夏仁学, 曹秀, 等. 生长调节剂和基质对根毛发育的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(6): 1437 – 1442.
ZHANG Dejian, XIA Renxue, CAO Xiu, *et al.* Effects of growth regulators and grow media on root-hair development of *Poncirus trifoliata* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22**(6): 1437 – 1442.
- [9] 杨延杰, 赵康, 陈宁, 等. 不同基质理化性状对春季番茄幼苗生长及根系形态的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, **22**(7): 125 – 131.
YANG Yanjie, ZHAO Kang, CHEN Ning, *et al.* Effect of different substrate physicochemical properties on grow and root morphology of tomato plug-seedlings in spring [J]. *Acta Agric Boreal-Occident Sin*, 2013, **22**(7): 125 – 131.
- [10] 乌丽雅斯, 刘勇, 李瑞生, 等. 容器育苗质量调控技术研究评述[J]. *世界林业研究*, 2004, **17**(2): 9 – 13.
Wuliyasi, LIU Yong, LI Ruisheng, *et al.* Reviewing on quality modification and control techniques of containerized seedling [J]. *World For Res*, 2004, **17**(2): 9 – 13.
- [11] DUMROESE R K, DAVIS A S, JACOBS D F. Nursery response of *Acacia koa* seedlings to container size, irrigation method, and fertilization rate [J]. *J Plant Nutr*, 2011, **34**(6): 877 – 887.
- [12] 陈闯, 刘勇, 李国雷, 等. 底部渗灌和容器规格对栓皮栎容器苗生长及营养元素含量的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, **39**(3): 59 – 64.
CHEN Chuang, LIU Yong, LI Guolei, *et al.* Effects of subirrigation and container size on growth and nutrient element content of containerized *Quercus variabilis* Blume seedlings [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2015, **39**(3): 59 – 64.
- [13] 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.
CHEN Chuang, LIU Yong, LI Guolei, *et al.* Effects of sub-irrigation gradients on growth and nutrient status of containerized seedlings of *Quercus variabilis* [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51**(7): 21 – 27.
- [14] 奚旺, 刘勇, 马履一, 等. 底部渗灌对华北落叶松容器苗水肥利用状况及生长, 光合特性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2014, **42**(12): 37 – 42.
XI Wang, LIU Yong, MA Lüyi, *et al.* Effect of sub-irrigation with different water and fertilizer supplies on growth, photosynthetic characteristics and water-use efficiency of containerized *Larix principis-rupprechtii* Mayr. seedlings

- [J]. *J Northeast For Univ*, 2014, **42**(12): 37 – 42.
- [15] 奚旺, 刘勇, 马履一, 等. 底部渗灌条件下水肥对华北落叶松容器苗生长及基质 pH 值, 电导率的影响[J]. 林业科学, 2015, **51**(6): 36 – 43.
XI Wang, LIU Yong, MA Lüyi, *et al.* Effects of sub-irrigation with different water and fertilizer supplies on growth, media pH and electric conductance of containerized *Larix principis-rupprechtii* seedlings [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51**(6): 36 – 43.
- [16] 毛海颖, 马履一, 贾忠奎, 等. 气候因素对栓皮栎容器苗耗水规律的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38**(7): 25 – 28.
MAO Haiying, MA Lüyi, JIA Zhongkui, *et al.* Effects of climate factors on water consumption law of *Quercus variabilis* seedlings [J]. *J Northeast For Univ*, 2010, **38**(7): 25 – 28.
- [17] LANDIS T D, WILKINSON K M. Water quality and irrigation [G]//WILKINSON K M, LANDIS T D, HAASE D L, *et al.* *Tropical Nursery Manual: A Guide to Starting and Operating a Nursery for Native and Traditional Plants*. Washington D C: USDA Forest Service, 2014: 207 – 231.
- [18] 李霞. 控根栽培对桂花根系构型及功能变化影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
LI Xia. *The Effect on Osmanthus fragrans's Root System and Function Under the Control Root Cultivation Mode* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [19] BURDETT A N. Juvenile instability in planted pines [J]. *Irish For*, 1979, **36**(1): 36 – 47.
- [20] WENNY D L, WOOLLEN R L. Chemical root pruning improves the root system morphology of containerized seedlings [J]. *Western J Appl For*, 1989, **4**(1): 15 – 17.
- [21] 王良桂, 李霞, 杨秀莲. 控根栽培下桂花根系的动态生长与垂直分布特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, **35**(4): 43 – 46.
WANG Lianggui, LI Xia, YANG Xiulian. The growing dynamics and vertical distribution feature of *Osmanthus fragrans* seedling root system under the root-controlling cultivation [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2011, **35**(4): 43 – 46.
- [22] MARLER T E, WILLIS D. Research reports chemical or air root-pruning containers improve carambola, longan, and mango seedling root morphology and initial root growth after transplanting [J]. *J Environ Hort*, 1996, **14**(2): 47 – 49.
- [23] 王月海, 房用, 史少军, 等. 平衡根系无纺布容器苗造林试验[J]. 东北林业大学学报, 2008, **36**(1): 14 – 15.
WANG Yuehai, FANG Yong, SHI Shaojun, *et al.* Aforestation by no-woven-cloth container seedlings with balanced root system [J]. *J Northeast For Univ*, 2008, **36**(1): 14 – 15.
- [24] BOWEN G D. Tree roots and the use of soil nutrients [G]//BOWEN G D, NAMBIAR E K S. *Nutrition Plantation Forests*. Rome; FAO, 1984: 147 – 179.
- [25] 张金浩, 周再知, 杨晓清, 等. 氮素营养对肯氏南洋杉幼苗生长, 根系活力及氮含量的影响[J]. 林业科学, 2014, **50**(2): 31 – 36.
ZHANG Jinhao, ZHOU Zaizhi, YANG Xiaoqing, *et al.* Effects of exponential nitrogen loading on growth, root activity and N content of *Araucaria cunninghamii* seedlings [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(2): 31 – 36.
- [26] PREGITZER K S, DEFOREST J L, BURTON A J, *et al.* Fine root architecture of nine North American trees [J]. *Ecol Monogr*, 2002, **72**(2): 293 – 309.
- [27] 吴文勇, 杨培岭, 刘洪禄. 温室土壤—植物—环境连续体水热运移研究进展[J]. 灌溉排水, 2002, **21**(1): 76 – 78.
WU Wenyong, YANG Peiling, LIU Honglu. Retrospect and prospect on researches of water and heat transfer in soil-plant-environment continuum (SPEC) in greenhouse [J]. *Irrig Drain*, 2002, **21**(1): 76 – 78.