

氮素指数施肥对落羽杉苗木生长及养分积累的影响

朱小楼¹, 曹 嵘¹, 朱旻华², 柳结苗², 吴家森²

(1. 浙江省桐乡市林业工作站, 浙江 桐乡 314500; 2. 浙江农林大学, 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300;)

摘要: 于2016年4月1日开始, 在浙江省桐乡市以1年生落羽杉 *Taxodium distichum* 苗为材料, 采用温室盆栽方法, 设常规施肥(CF)和指数施肥(EF1, EF2, EF3, EF4)5种处理, 共施氮5次, 纯氮总用量分别为5.0, 1.0, 3.0, 5.0, 8.0 g·株⁻¹。生长结束后, 利用全收获法测定落羽杉的株高、地径、生物量及养分含量。结果表明, EF3的苗高和EF2的地径显著高于CF ($P<0.05$), 与CF相比, EF2地上部、地下部和总生物量显著增加了42.9%, 44.3%和43.5% ($P<0.05$); 与CF比较, EF地下部氮积累量显著增加了37.5%~86.6%, EF1, EF2, EF3地上部氮和钾积累量显著高于CF ($P<0.05$); EF磷积累量和地下部钾积累量均显著高于CF ($P<0.05$)。氮素指数施肥显著提高了落羽杉幼苗生长, 施氮量为3.0 g·株⁻¹的指数施肥是落羽杉苗木温室培育的适宜方法。探讨氮素指数施肥对落羽杉幼苗生长及养分积累的影响, 为落羽杉苗木培育提供基础。

关键词: 落羽杉; 生物量; 氮; 磷; 钾; 指数施肥;

中图分类号: S723.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776 (2018) 06-0059-06

Effect of NExponential Fertilization on Growth and Nutrient Accumulation Of *Taxodium distichum* Seedlings

ZHU Xiao-lou¹, CAO Rong¹, ZHU Min-hua², LIU Jie-miao², WU Jia-sen²

(1. Tongxiang Forestry Station of Zhejiang, Tongxiang 314500, China; 2. Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: On April 1, 2016, 1-year *Taxodium distichum* seedlings were potted at greenhouse in Tongxiang, Zhejiang province. They were treated by conventional fertilization (CF, 5.0 g/seedling), Nexponential fertilization of EF1 (1.0 g), EF2 (3.0 g), EF3 (5.0 g) and EF4 (8.0 g) with randomized blocks design. Nitrogen application was designed 5 times with interval of 30 days. On October 20 of the current year, seedling height, ground diameter, biomass and nutrient content was determined by whole harvest method. The result demonstrated that seedlings with treatment of EF3 had evident higher height than that of CF and that of ground diameter with EF2 was the same. Above-ground, underground and total biomass of seedling with treatment of EF2 increased by 42.9%, 44.3% and 43.5 from ($P<0.05$) compared with that of CF. N accumulation of underground part of seedlings treated by EF increased by 37.5%~86.6%, compared with that by CF. N and K accumulation of above-ground parts of seedlings treated by EF1, EF2 and EF3 was evidently higher than that by CF ($P<0.05$). P accumulation in seedlings treated by EF and K accumulation in underground part of that treated by EF was higher than that by CF ($P<0.05$). The experiment resulted that exponential nitrogen had significant effects on the growth of *T.*

收稿日期: 2018-05-17; **修回日期:** 2018-09-22

基金项目: 浙江省桐乡市农经局项目 (H20160159)

作者简介: 朱小楼, 工程师, 从事种苗培育与林业技术推广工作; E-mail: 157372156@qq.com。通信作者: 吴家森, 教授级高级工程师, 从事森林土壤与环境研究; E-mail: jswu@zafu.edu.cn。

distichum seedlings, especially the treatment of EF2.

Key words: *Taxodium distichum*; biomass; nitrogen; potassium; phosphorus; exponential fertilization

苗木质量的好坏直接影响造林效果, 优质苗木的选用可以提高造林成活率, 促进早期生长^[1]。良好的苗木不仅要有一定的苗高、地径, 更表现在植株内部养分的积累。指数施肥是根据植物在各生长阶段对养分的需求规律, 采用指数递增的养分添加方式而进行的一种施肥方法。指数施肥可诱导植株稳态奢侈养分消耗, 有效提高苗木体内养分载荷, 增强苗木的竞争能力, 从而更好地适应造林地的立地条件^[2-4]。目前, 国内外已对黑云杉 *Picea mariana*^[5], 日本落叶松 *Larix kaempferi*^[6], 西铁杉 *Tsuga heterophylla*^[7], 花旗松 *Pseudotsuga menziesii*^[8], 栓皮栎 *Quercus variabilis*^[9], 斑叶稠李 *Padus maackii*^[10], 楸 *Catalpa bungei*^[11], 油松 *Pinus tabulaeformis*^[12], 檀香 *Santalum album*^[13], 红楠 *Machilus thunbergii*^[14], 杉木 *Cunninghamia lanceolata*^[15-16]等树种开展了指数施肥与应用技术的研究。结果表明, 指数施肥促进了苗木地径和株高的生长, 有利于氮磷钾等元素在植株体内的积累。

落羽杉 *Taxodium distichum* 原产北美东南部, 于 20 世纪初引种到我国, 生长快、材质优良、适应性强、耐涝渍和土壤瘠薄, 已成为我国平原湖区和丘陵山地重要的造林树种和园林绿化植物^[17]。落羽杉 1 年生苗的生长规律、土壤盐分及水分对苗木生长的影响等已有了相关研究^[18-20], 但不同施肥对苗木生长及养分积累的影响则未见报道。本试验以 1 年生落羽杉实生苗为对象, 在盆栽条件下研究不同施肥对其生长和氮磷钾养分积累的影响, 可为落羽杉苗木培育的营养管理提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在浙江省桐乡市林业站种苗繁育基地的温室大棚, 120°32'38" E, 30°41'52" N。属于中亚热带季风气候, 年均日照 1 983.4 h, 年均降水量 1 212.3 mm, 年均气温 16.9℃, 极端最低气温 - 11.0℃, 极端最高气温 41.1℃, 年无霜期 244 d。

1.2 试验材料

2016 年 4 月 1 日, 选取桐乡市林业站种苗繁育基地培育的生长基本一致的 1 年生落羽杉实生苗 75 株, 其平均苗高和地径分别为 95.7 cm, 0.64 cm, 栽于 23 cm × 24 cm × 28 cm (底径 × 上口径 × 高) 的塑料花盆中, 每盆 1 株, 栽培基质为水稻土:菌糠 (1:1), pH 5.8, 有机碳 20.6 g · kg⁻¹, 碱解氮 118.2 mg · kg⁻¹, 有效磷 19.8 mg · kg⁻¹, 速效钾 125.5 mg · kg⁻¹, 每个花盆装栽培基质 10 kg。为了防止水肥流失, 每个花盆配有塑料托盘。

1.3 研究方法

1.3.1 试验设计与施肥方法 采用随机区组设计, 共设常规施肥 (CF)、指数施肥 (EF1, EF2, EF3, EF4) 5 个处理, 纯氮用量分别为 5.0, 1.0, 3.0, 5.0, 8.0 g · 株⁻¹, 施肥进度和施用量见表 1, 以指数施肥模型来确定每次的施氮量^[15]。每个处理 15 株苗木, 重复 3 次, 每重复 5 株。每株施用 10.0 g 过磷酸钙 (P₂O₅ 12%, 山东鑫卓源化工有限公司生产) 和 5.0 g 硫酸钾 (K₂O 50%, 山东海化股份有限公司生产) 作底肥在第一次施肥时施入。施肥方法: 在离植株 5 cm 根圈挖取 2 cm 深的环沟, 将过磷酸钙和硫酸钾施入后, 用小铲埋平。将尿素 (氮 46.4%, 安徽吴源化工集团有限公司生产) 换算成表 1 中的纯氮用量, 溶于水中, 而后用量筒对同一处理的苗木进行等量浇灌。

表 1 不同处理的施肥时间和施用量
Table 1 Fertilization time and dosage of different treatments

处理	施纯N时间和施用量/(g·株 ⁻¹)					小计
	5月5日	6月5日	7月5日	8月5日	9月12日	
CF	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	5.00
EF1	0.05	0.08	0.15	0.29	0.43	1.00
EF2	0.17	0.27	0.47	0.84	1.25	3.00
EF3	0.27	0.43	0.76	1.35	2.19	5.00
EF4	0.43	0.69	1.22	2.08	3.58	8.00

1.3.2 样品采集及分析方法

生物量测定: 落羽杉生长结束时, 于 2016 年 10 月 20 日, 将不同处理的苗木全部收获, 用游标卡尺和卷尺测量苗木地径及苗高。然后用清水洗净, 再用去离子水润洗。按地上部(枝、叶)和地下部(根系)分别剪下, 置于烘箱内, 105℃杀青 30 min, 70℃烘 48 h 至恒量, 用电子天平测其干质量, 即为不同器官的生物量。

总生物量($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)=地上部生物量+地下部生物量

养分测定: 将称量后的样品粉碎过 0.5 mm 筛, 用元素分析仪(德国·Elementer, VARIO Macro)测定氮质量分数。过筛后的样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮后, 火焰光度计法测定钾质量分数, 钼蓝比色-分光光度法测定磷质量分数。

养分积累量($\text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$)=不同器官养分质量分数($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) \times 相应生物量($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)

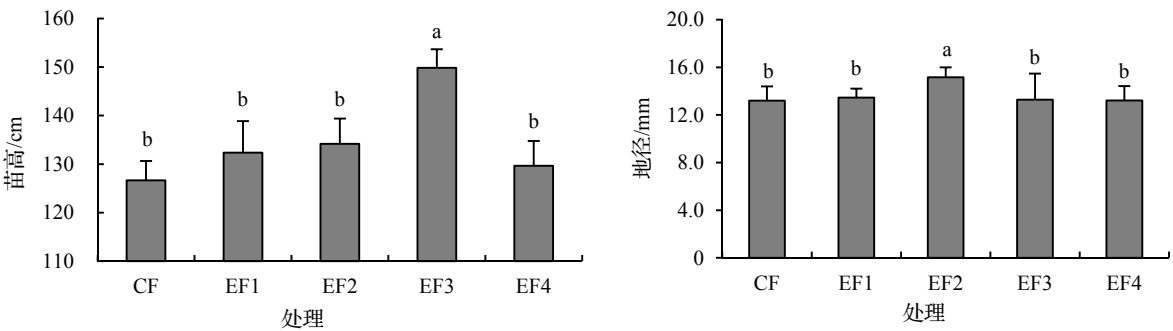
1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 20.0 对数据进行描述统计和正态检验, 然后进行单因素方差分析, 并用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对落羽杉幼苗株高和地径生长的影响

如图 1 所示, 与 CF 相比, EF 处理的落羽杉幼苗株高增长了 2.3%~18.3%, 地径增大了 0.1%~14.9%, 其中 EF3 的苗高和 EF2 的地径显著高于 CF ($P<0.05$)。



注: 图中不同字母表示处理间有显著性差异 ($P<0.05$)。下同。

图 1 不同施肥处理对落羽杉幼苗株高和地径生长的影响

Figure 1 Height and ground diameter of *T. distichum* seedlings under different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对落羽杉生物量的影响

如图 2 所示, 与 CF 相比, EF 处理的落羽杉幼苗地上部、地下部和总生物量增加了 13.3%~42.9%, 5.4%~44.3%和 13.1%~43.5%。EF 处理中, 随着施肥量的增加, 植株生物量呈现先增加后减小的趋势, 施氮量为 $3.0\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 的 EF2 处理的生物量最大, 其中地下部、全株生物量均显著高于其它处理 ($P<0.05$)。

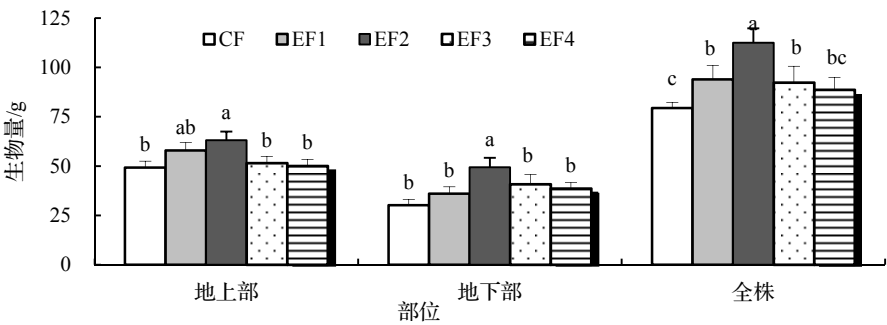


图 2 不同施肥处理对落羽杉不同部位生物量的影响

Figure 2 Biomass of different organs of *T. distichum* seedlings under different fertilization treatments

2.3 不同施肥处理对落羽杉幼苗养分积累的影响

2.3.1 不同施肥处理对落羽杉幼苗氮积累的影响 如图3所示,与CF相比,EF处理地上部氮积累量增加了8.9%~45.9%,其中EF1, EF2, EF3处理显著高于CF ($P<0.05$); 地下部氮积累量大小为EF2>EF3>EF4>EF1>CF, 与CF相比, EF处理氮积累量显著增加,增加了37.5%~86.6% ($P<0.05$)。EF2处理地上部和地下部的氮积累量均为最大,分别为1392.1, 846.2 mg·株⁻¹。

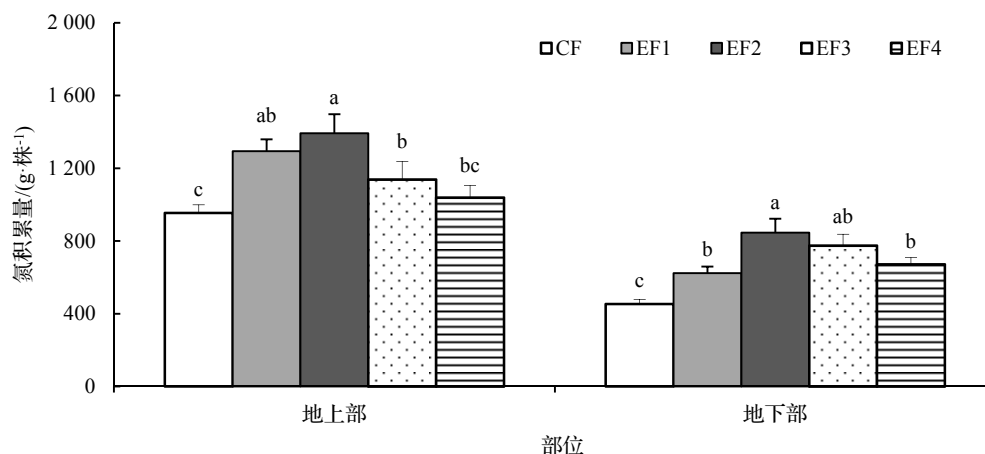


图3 不同施肥处理对落羽杉幼苗不同部位氮积累量的影响

Figure 3 N accumulation in different organs of *T. distichum* seedlings with different fertilization treatments

2.3.2 不同施肥处理对落羽杉幼苗磷积累的影响 如图4所示, EF处理地上部和地下部磷积累量均显著高于CF ($P<0.05$), 其磷积累量分别增加了26.1%~81.0%, 37.0%~76.0%。随着指数施肥量的增加, 植株磷积累先增加而后减小, 其中EF2处理磷积累量地上部显著高于EF1, EF3, EF4 ($P<0.05$), 地下部则显著高于EF3, EF4 ($P<0.05$)。

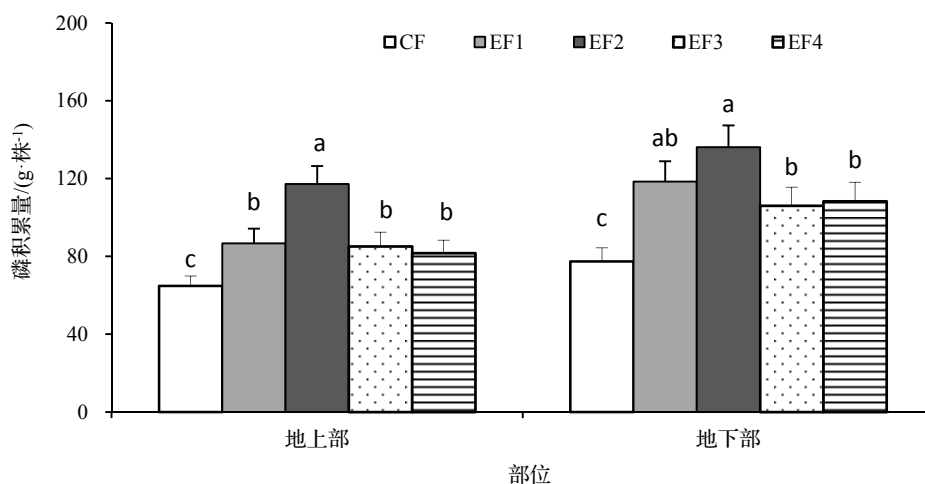


图4 不同施肥处理对落羽杉幼苗不同部位磷积累量的影响

Figure 4 P accumulation in different organs of *T. distichum* seedlings under different fertilization treatments

2.3.3 不同施肥处理对落羽杉幼苗钾积累的影响 如图5所示,地上部钾积累量大小为EF2>EF1>EF3>EF4>CF, EF1, EF2, EF3处理地上部钾积累量均显著高于CF ($P<0.05$), 钾积累量增加了11.7%~52.6%; 与CF相比, EF处理的地下部钾积累量显著增加了23.5%~74.6% ($P<0.05$), 其中EF2处理的钾积累量为最高值, 地上部和地下部钾积累量分别531.7, 440.7 mg·株⁻¹。

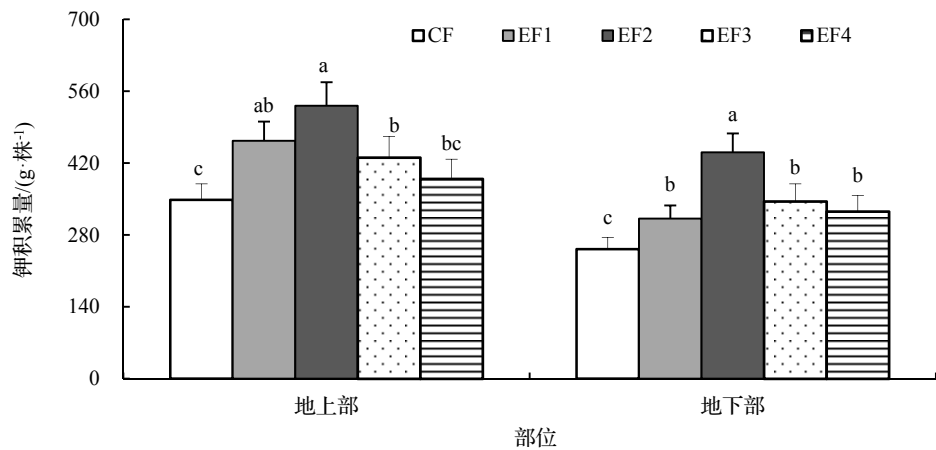


图 5 不同施肥处理对落羽杉幼苗不同器官钾积累量的影响

Figure 5 K accumulation indifferent organs of *T. distichum* seedlings under different fertilization treatments

2.4 不同施肥处理对落羽杉生物量及氮磷钾分配的影响

由表 2 可知,随着施氮量的增加,EF 处理落羽杉生物量和氮积累量的地下部与地上部的比例先增加而后降低,EF2, EF3, EF4 处理显著高于 EF1, CF ($P<0.05$)。磷、钾积累量在地下部与地上部的比例在不同处理间没有显著性差异。

表 2 不同施肥处理对落羽杉不同部位生物量及氮磷钾分配比例的影响
Table 2 Biomass and nutrient distribution of *T. distichum* under different fertilization treatments

处理	地下部/地上部比例			
	生物量	氮	磷	钾
CF	0.61±0.05b	0.48±0.04b	1.19±0.12a	0.72±0.08a
EF1	0.62±0.04b	0.48±0.05b	1.37±0.14a	0.67±0.08a
EF2	0.78±0.06a	0.61±0.05a	1.16±0.16a	0.83±0.09a
EF3	0.79±0.07a	0.68±0.07a	1.25±0.13a	0.80±0.07a
EF4	0.77±0.06a	0.65±0.06a	1.33±0.14a	0.84±0.09a

注:表中不同字母表示处理间有显著性差异($P<0.05$)。

3 讨论与结论

株高与地径是评价苗木质量好坏的外在指标。与 CF 相比,EF 处理落羽杉幼苗株高和地径均有所增加,其中 EF3 的苗高和 EF2 的地径显著高于 CF ($P<0.05$),即适量的氮素指数施肥能明显促进株高和地径的生长,这与指数施肥均能显著提高杉木^[15]、土沉香 *Aquilaria sinensis*^[21]苗高和地径不同,造成这种差异的原因主要是植物种类、苗木类型、施肥量等的不同。

生物量是衡量苗木生产力高低的重要指标。氮素指数施肥促进了落羽杉幼苗生物量的积累,其中 EF2 处理的地上部、地下部和总生物量均显著高于 CF ($P<0.05$),说明适量的指数施肥能明显促进苗木干物质的积累^[10,22]。本研究中 EF3, EF4 处理的施氮量分别是 EF2 处理的 1.67, 2.67 倍,但生物量不升反降,说明施氮过量引起苗木轻微中毒^[5,9],抑制了苗木生物量的积累^[11]。

适量的氮素指数施肥能提高苗木氮的积累,而氮积累量的增加促进了苗木的生长和竞争力,从而提高造林保存率。EF 处理落羽杉地下部氮积累量显著高于 CF ($P<0.05$),施肥量为 1.0~5.0 g·株⁻¹的指数施肥地上部的氮积累量也显著高于 CF ($P<0.05$)。不同指数施肥氮积累量均随施氮量的增加先增加而后降低,EF2 处理的地上部和地下部氮积累量最高,相关研究也表明,在养分的添加过程中,当养分供不应求或充足时,苗木养分含量随养分供给的增加而增加;当养分供给超过苗木的最佳需求时,养分含量不会继续增加,甚至会下降^[5,23]。

氮素指数施肥也有利于落羽杉幼苗磷、钾的积累,EF 处理磷、钾积累量均高于 CF。EF 处理落羽杉磷积累

量和地下部钾积累量均显著高于 CF ($P < 0.05$), EF1, EF2, EF3 地上部钾积累量也显著高于 CF ($P < 0.05$)。这与郝龙飞等^[24]研究结果相似,即指数施肥提高了苗木 P, K 吸收,增强了养分承载。主要是由于氮素指数施肥提高了落羽杉幼苗地下部生物量分配,增强了苗木地下部对 P, K 的吸收能力^[25],另一方面指数施肥提高了苗木氮积累量和地下部的分配,苗木体内的养分需保持一定的平衡,从而也提高了幼苗对其他养分的需求,增强了对 P, K 的吸收^[5]。

分析表明,氮素指数施肥有效促进了落羽杉幼苗的生长,提高了生物量,改善了苗木营养状态和养分承载。从苗木株高、地径及氮、磷、钾积累量等方面考虑,EF2 处理 ($3.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$) 为落羽杉的最佳施肥方式。

参考文献:

- [1] 孙慧彦,刘勇,马履一,等. 氮磷供给对长白落叶松苗木质量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2011, 32 (3): 58–62.
- [2] OLIVET J A, PLANELLES R, APTERO F, *et al.* Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid condition: relative influence of seeding morphology and mineral nutrition[J]. NewFor, 2009, 37: 313–331.
- [3] SALIFU K F, JACOBS D F, BIRGE Z K D. Nursery nitrogen loading improves field performance of bare root oak seedlings planted on abandoned mine lands[J]. RestorEcol, 2009, 17 (3): 339–349.
- [4] 魏红旭,徐程扬,马履一,等. 苗木指数施肥技术研究进展[J]. 林业科学, 2010, 46 (7): 140–146.
- [5] SALIFU K F, TIMMER V R. Nitrogen retrans location response of seedling to nitro gensupply[J]. Soil SciSoc Am J, 2003, 67: 309–318.
- [6] QU L, QUORESHI A M, KOIKE T. Root growth characteristics, biomass and nutrient dynamics of seedlings of two larch species raised under different fertilization regimes[J]. Plant Soil, 2003, 255, 293–302.
- [7] HAWKINS B J, BURGESS D, MITCHELL A K. Growth and nutrient dynamics of western hemlock with conventional or exponential greenhouse fertilization and planting in different fertility conditions[J]. Can J For Res, 2005, 35 (4): 1002–1016.
- [8] EVERETT K T, HAWKINS B J, KIISKILA S. Growth and nutrient dynamics of Douglas-fir seedlings raised with exponential or conventional fertilization and planted with or without fertilizer[J]. Can J For Res, 2007, 37: 2552–2562.
- [9] 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.
- [10] 郝龙飞,王庆成,张彦东,等. 指数施肥对山桃稠李播种苗生物量及养分动态的影响[J]. 林业科学, 2012, 48 (6): 33–39.
- [11] 王力朋,晏紫伊,李吉跃,等. 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响[J]. 生态学报, 2012, 32 (23): 7452–7462.
- [12] 林平,邹尚庆,李国雷,等. 油松容器苗生长和氮吸收对指数施肥的响应[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2013, 37 (3): 23–28.
- [13] 李双喜,杨曾奖,徐大平,等. 施氮量对檀香幼苗生长及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (3): 807–814.
- [14] 徐嘉科,陈闻,王晶,等. 不同施肥方式对红楠生长及营养特性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34 (5): 1241–1245.
- [15] 刘欢,王超琦,吴家森,等. 氮素指数施肥对杉木无性系苗生长及养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (10): 3123–3128.
- [16] 刘欢,王超琦,吴家森,等. 氮素指数施肥对 1 年生杉木苗生长及氮素积累的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34 (3): 459–464.
- [17] 柳学军,曹福亮,汪贵斌,等. 落羽杉优良种源选择[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, 30 (2): 47–50.
- [18] 王桂珍,刘朝奎,陈道静. 落羽杉 1 年生播种苗生长特性研究[J]. 西南林学院学报, 2007, 27 (5): 5–7.
- [19] 汪贵斌,曹福亮. 土壤盐分及水分含量对落羽杉幼苗生长的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15 (12): 2396–2400.
- [20] 韩路弯,施钦,宣磊,等. 淹水胁迫下中山杉及落羽杉的生长特性研究[J]. 浙江林业科技, 2017, 37 (3): 1–8.
- [21] 王冉,李吉跃,张方秋,等. 不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响[J]. 生态学报, 2011, 31 (1): 98–106.
- [22] MALIK V, TIMMER V R. Biomass partitioning and nitrogen retrans location in black spruce seedlings on competitive mixed wood sites: a bioassay study[J]. CanJ For Res, 1998, 28 (2): 206–215.
- [23] TIMMER V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedlings performance on competitive sites[J]. New For, 1996, 13 (1): 275–295.
- [24] 郝龙飞,刘婷岩,张连飞,等. 氮素指数施肥对白桦播种苗养分承载和光合作用的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36 (6): 17–23.
- [25] THOMPSON D G, PITTD G. A review of Canadian forest vegetation management research and practice[J]. Ann ForSci, 2003, 60 (7): 559–572.