

不同指数施肥方法下长白落叶松播种苗的需肥规律

魏红旭^{1,2}, 徐程扬^{1,2,*}, 马履一^{1,2}, 江俐妮^{1,2}, 姜长吉³, 刘福森³, 张启昌⁴

(1. 北京林业大学林学院 100083; 2. 教育部、北京市共建北京林业大学森林培育与保护重点实验室 100083;

3. 吉林市龙潭区江密峰苗圃 132206; 4. 吉林市北华大学林学院 132013)

摘要: 为了探讨长白落叶松苗木的最适 N 含量和供 N 速率, 应用 3 种不同指数施肥方法在大田条件下进行试验。结果表明: 经过 111d 的生长, 供 N 总量为 $30\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 的指数施肥处理下的苗木可以获得相对较高的生物量积累和 N 含量水平, 该处理还可以使得苗木在 103d 的生长中获得 $0.29\text{mg} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 的 N 添加速率。在该速率下, 苗木生物量、N 含量和 N 吸收效率分别可以达到 $637.80\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 、 $8.10\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 41.77% 。根据生物量和 N 含量随着供 N 量增加的二项式回归拟合结果, 在 111d 的生长过程中 $24.3\text{—}33.7\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 的供 N 总量可以使得苗木获得较高的生物量积累水平和 N 利用效率。试验设置的总供 N 量为 $30\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 的处理优于 $60\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 或 $70\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

关键词: 长白落叶松; 指数施肥; 生物量; 稳态养分; 氮

Nutrient uptake of *Larix olgensis* seedlings in response to different exponential regimes

WEI Hongxu^{1,2}, XU Chengyang^{1,2,*}, MA Lüyi^{1,2}, JIANG Lini^{1,2}, JIANG Changji³, LIU Fusen³, ZHANG Qichang⁴

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Silviculture and Conservation, Ministry of Education, College of Natural Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Jiang Mifeng Nursery, Jilin 132206, China

4 College of Forestry, Beihua University, Jilin 132022, China

Abstract: The aim of this paper was to determine the optimum seedling N content and rate of N fertilizer application for *Larix olgensis* in a field culture experiment conducted with three exponential N fertilization regimes. The treatment that resulted in both the greatest seedling biomass and the highest seedling N content after 111 days of growth applied a total of 30mg N plant^{-1} at an exponentially increasing rate. This treatment resulted in a average optimum N application rate of $0.29\text{mg plant}^{-1} \text{d}^{-1}$ over 103 days of growth. In this treatment, seedling biomass, N content and N uptake efficiency were $637.80\text{mg plant}^{-1}$, $8.10\text{mg N plant}^{-1}$ and 41.77% , respectively. Based on binomial regression of the biomass and N content growth curves from the three N fertilization treatments, $24.3\text{ to }33.7\text{mg plant}^{-1}$ N supplied in 111d resulted in the greatest biomass and highest N efficiency. We conclude that the treatment with 30mgN plant^{-1} supplied produced better seedlings than either 60mgN plant^{-1} or 70mgN plant^{-1} treatments.

Key Words: *Larix olgensis*; exponential fertilizer; biomass; steady-state mineral nutrient; nitrogen

N 是植物生长所需的大量营养元素之一, 是限制植物生产力最重要的元素^[1-2]。目前在苗木培育过程中, 由于施肥方法的不合理存在着严重的 N 利用效率低下的问题, 所施 N 肥的 $32\% \text{—} 85\%$ 无法被植物吸收利用^[3-4], 如何提高苗木的 N 利用效率成为目前研究的热点之一。自从 20 世纪 80 年代“指数养分承载理论”^[5]

基金项目: 国家“十一五”科技攻关资助项目(2006BAD24B01)

收稿日期: 2008-11-18; 修订日期: 2009-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Cyxu@bjfu.edu.cn

在瑞典被应用于苗木养分研究领域开始^[6],人们逐渐发现指数施肥方法对于提高苗木的养分利用效率具有极其积极的作用^[5,7-10]。大量研究结果表明,指数施肥方法可以提高植物抗富养胁迫的能力,并使得自身养分含量通过稳态积累达到一个较高的水平^[11],以充分满足苗木在新生长季的养分需要^[5]。近些年来,国外的指数施肥研究重点已经由苗圃培育阶段的需肥规律研究^[5,10],逐渐专向为利用经指数施肥制度培育的苗木在矿区^[12-13]和贫瘠立地条件^[14]下的表现。而我国目前在这方面的研究甚是匮乏。

长白落叶松(*Larix olgensis*)是中国东北地区速生丰产林的主要树种。常规的长白落叶松追肥措施多为3至6次施肥量差异不是十分明显的直线施肥方法,这种施肥方式不符合苗木对于养分的需求规律,不仅造成极大的经济、人力和物力的浪费,而且不利于优质苗木的培育。本文以1年生长白落叶松播种苗为试验材料,在大田环境下开展指数施肥试验,为苗木培育和相关研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料及试验地概况

研究地点位于吉林市龙潭区江密峰苗圃(126°45'E,43°45'N)。该地区为温带大陆性季风气候,年均气温4℃,1月份平均气温1℃,7月份平均气温22℃,年降水量650—750mm,日均温10℃以上活动积温2400—3000℃,日照时数2400—2600h。土壤为暗棕壤,有机质含量5.64mg·g⁻¹,全氮含量为2.91mg·g⁻¹,全磷含量为1.00mg·g⁻¹,全钾含量24.9mg·g⁻¹,有效磷含量265.59mg·kg⁻¹,速效钾含量268.57mg·kg⁻¹,pH值6.17。

试验材料为春季播种的当年生长白落叶松播种苗。种子来源于吉林省小北湖种源,种子千粒质量为3.90g,发芽率35.12%。2007年5月5日播种,播种量为5.5g·m⁻²。

1.2 试验设计

本次试验采用目前使用最为广泛的指数施肥模型^[5,10]来确定施肥量,具体如下:

$$N_t = N_s(e^r - 1) - N_{(t-1)}$$

式中, N_t 为在相对增加率 r 下的第 t 次施肥时的施肥量, N_s 为在施肥处理的最初阶段苗木的养分含量^[5], $N_{(t-1)}$ 为包括第 $t-1$ 次施肥在内的养分施入总量^[10]。 r 的确定参考Dumroese等^[10]的方法:

$$N_T = N_s(e^r - 1)$$

式中, N_T 为经过 t 次施肥后最终苗木养分含量(假设施肥效率为100%)。本试验设3个指数施肥处理和一个不施肥的对照处理,具体施肥量见表1。其中 N_s 的设定参考Hawkins等^[5]和Dumroese等^[10], $N_s = 0.8\text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 。经计算长白落叶松苗木的 N_T 为31.0mg·株⁻¹^[15],指数1的 N_T 采用此值,并经计算得到 $r_{\text{指数1}} = 0.46$ 。指数2和指数3属于高N水平指数施肥处理,其 N_T 值略小于生产最小追N总量,分别为60.0mg·株⁻¹和70.0mg·株⁻¹,对应的 $r_{\text{指数2}}$ 和 $r_{\text{指数3}}$ 分别为0.54和0.56。

1.3 试验方法

2007年5月5日在苗圃中随机挑选一条东西方向的苗床,利用拖拉机进行整地做床同时施入30g·m⁻²的二铵(含N18%,含P₂O₅46%)作为基肥。整地后立即进行播种,播种方法为撒播。水分及杂草管理与生产同步。6月16日幼苗真叶形成之后,在苗床上随机挑选12块试验小区,每小区定株数量为500—600株,面积为1m×1m。6月21日(播种后第47天)进行第一次追肥处理,追肥种类为尿素(含N46%),追肥方法为水溶后浇灌,每两次追肥间隔期为1周。每次追肥前分3人数1m²面积内苗木总数量,以3人数得的平均值作为单位面积内苗木数量,确定1m²施肥总量。

1.4 生物量、N含量测定及数据分析

分别于播种后的第55天、71天、87天、103天和111天(最后一次追肥后1周时间)追肥前进行取样。取样苗木置于烘箱内,85℃烘干至恒重,用电子天平(±0.0001g)称重测定生物量。将测定生物量后的样品用干样粉碎机粉碎后用四分法取0.1g粉碎样品,过筛,经H₂SO₄-H₂O₂法消化后用凯氏定氮法测定植株N含量。应用Microsoft Excel软件和SPSS15.0软件对数据进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 幼苗生物量与施肥量的关系

在 103d 当 E1 的累计施肥量为 $19.30\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 时生物量显著增加至 $637.80\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$,之后变化不显著(图 1A)。在 88d 至 103d,E1 的生物量净增量显著高于其它处理和对照(图 1B)。在 87d 当 E2 和 E3 的积累供 N 量分别为 $11.20\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 和 $12.30\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 时生物量明显增加,但是变化不显著(图 1A),这说明当供 N 量为 $19.30\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 时长白落叶松播种苗的生物量积累达到最大值。在 111d,E1 的生物量高于对照的 36.70%,同时分别显著高于 E2、E3 的 71.20%和 67.00%,这说明在一定供 N 水平范围内生物量积累随着供 N 量的增加而提高,如果供 N 量过大生物量积累则会下降。

表 1 不同指数施肥处理下施 N 肥量

Table 1 Weekly application of N on seedlings under different exponential fertilization regimes

播种后天数/d Days after seeding	施 N 量 amount of N fertilizer /($\text{mg}\cdot\text{seedling}^{-1}$)			
	处理 1 E1	处理 2 E2	处理 3 E3	对照 CK
47	0.50	0.60	0.60	0
55	0.70	1.00	1.10	0
63	1.20	1.70	1.80	0
71	1.90	2.90	3.20	0
79	2.90	5.00	5.60	0
87	4.70	8.60	9.90	0
95	7.40	14.70	17.30	0
103	11.70	25.30	30.30	0
总量 Total /($\text{g}\cdot\text{seedling}^{-1}$)	30.00	60.00	70.00	0

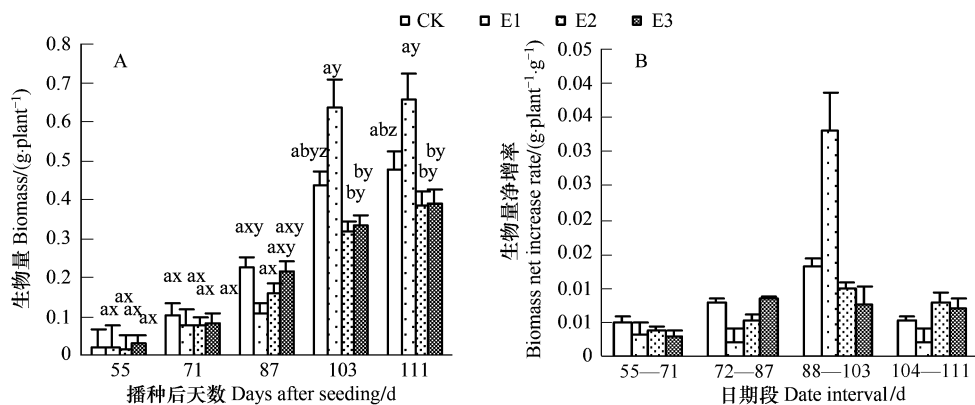


图 1 不同指数施肥处理对生物量(A)和生物量净增率(B)的影响

Fig.1 Biomass (A) and net biomass increase rate (B) under different exponential fertilization regimes

不同字母代表经 LSD 检验在 0.05 水平差异显著,其中 a, b, c 代表同一调查日内不同处理的比较,x, y, z 代表同一处理不同调查日的比较

2.2 苗木 N 含量对不同施肥处理的响应

在 87d,E3 的 N 含量显著提高并高于其它处理和 CK,之后变化不显著(图 2A)。在 103d,E1 的 N 含量 ($8.10\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$,图 2A)和 N 利用效率(41.77% ,图 2B)显著高于 E2 和 E3,这说明积累施肥总量 $19.30\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 会使长白落叶松播种苗达到比较高的 N 含量水平。在 111d,E1 和 E3 的 N 含量分别为 $5.90\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 和 $5.30\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$,均显著高于 CK 和 E2(图 2A),同时 E1 的 N 利用效率分别显著高于 E2 和 E3 的 15.70% 和 11.40% ,这说明 E1 能够有效提高长白落叶松播种苗的 N 含量和 N 利用效率,长白落叶松播种苗的最大含 N 量为 $8.10\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 。

2.3 供 N 量与生物量和 N 含量之间的关系

供 N 量与不同施肥处理下的生物量积累和 N 含量的均分别呈显著的二项式关系(图 3)。当 E1、E2、E3 的供 N 量分别为 33.7 、 56.7 、 $59.5\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 时,对应的生物量积累分别达到最大值 690.01 、 380.00 、 $400.00\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ (图 3A)。当 E1、E2、E3 的供 N 量分别为 24.30 、 35.30 、 $103.90\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 时,不同处理的 N 含量可以分别达到最大值 6.90 、 3.70 、 $5.50\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ (图 3B),对应的 N 利用效率分别为 28.48% 、 10.62% 和 5.30% 。可见,经过 111d 的苗木生长,当供 N 量在 $24.30\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 至 $33.70\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 的时候,长白落叶松播种苗可以获得比较高的生物量积累和 N 利用效率水平,因此供 N 总量为 $30\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 的 E1 处理较 E2、E3 更有利于苗木

生物量的增加和 N 吸收量的提高。

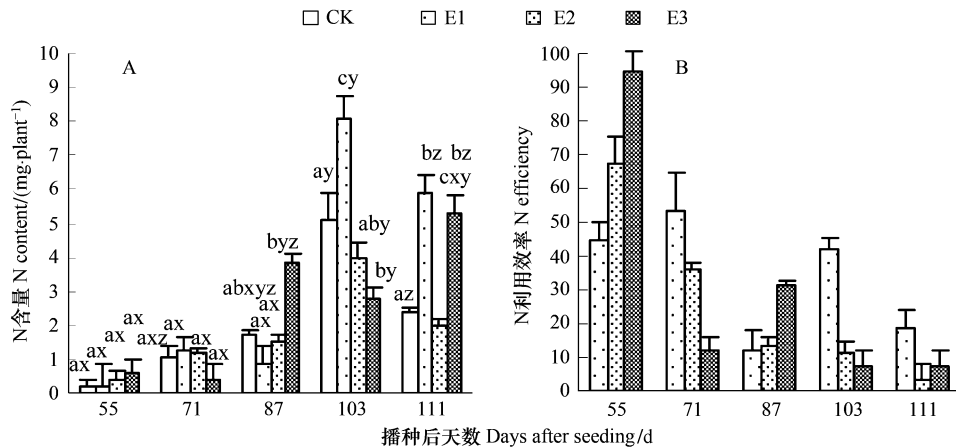


图2 不同指数施肥处理对 N 含量(A)和 N 积累利用效率(B)的影响

Fig.2 N content (A) and accumulated N efficiency (B) under different exponential fertilization regimes

不同字母代表经 LSD 检验在 0.05 水平差异显著,其中 a, b, c 代表同一调查日内不同处理的比较,x, y, z 代表同一处理不同调查日的比较

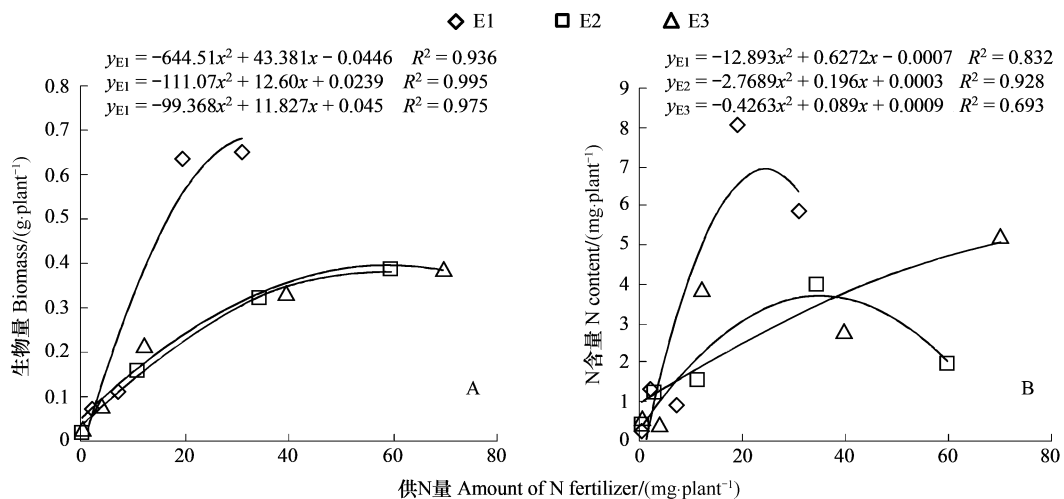


图3 生物量和 N 含量与供 N 量间关系

Fig.3 Relationships between amount of N fertilizer and biomass and N content respectively

3 讨论与结论

目前关于指数施肥制度下 N 供给量与苗木生物量、N 含量 ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)、N 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 间的关系,人们普遍认为,随着供养量的提高,苗木生物量和 N 含量呈现增加-平稳-下降的变化规律,而 N 浓度则在这个过程中持续的上升^[12]。很多研究结果表明,大量养分供给的指数施肥处理下苗木的生物量小于对照,但养分含量高于对照^[16-20]。本次研究结果表明,在 103d,处理 2、3 下苗木生物量和 N 含量均小于对照,但是 E2 不显著(图 2A);在 111d,处理 2、3 下苗木的生物量低于对照(图 1A),处理 3 下苗木的 N 含量显著高于对照,处理 2 下的苗木 N 含量显著小于对照。这也许是因为,在 103d,处理 2、3 的累计供 N 总量已经使苗木达到了 N 毒害(N toxicity)状态,但是在 111d 由于 E3 处理下的 N 浓度的持续提高,引起了 N 含量的显著增加。Hawkins 等^[5]的试验结果没有发现高 N 水平下指数施肥引起的苗木养分含量的相对提高,并将之解释为:(1)1 周 2 次的施肥频率使得养分产生损失;(2)所采用的试验材料对高浓度的养分添加反应不明显;(3)竞争作用使得养分含量下降。

将前人的指数施肥研究中关于供 N 总量与生物量、N 含量间关系结果拟合成一元二次方程^[17-19,21-26]后不

难发现,前人利用指数施肥方式进行试验所得到的苗木生物量积累和 N 含量最大时,对应的供 N 总量在 32.05—49.08 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 范围内。本次研究与其十分接近,在 111d,当供 N 量在 24.30 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 至 33.70 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 的时候,长白落叶松播种苗可以获得比较高的生物量积累和 N 利用效率水平,因此供 N 总量为 30 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 处理下的生物量积累(图 3A)和 N 利用水平(图 3B)均高于供 N 总量为 60 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 或 70 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 的处理。但是 Burgess^[27] 和 Miller 与 Timmer^[28] 的研究结果与该规律不相符合。Burgess^[27] 报道的 2 个试验所采用的试验方法完全相同(62 cm^3 cavities; 100:13:65 (N-P-K); semiweekly nutrient additions for 18 weeks; measured after 10 week treatment),但是两次试验的材料(*Pseudotsuga menziesii*, *Tsuga heterophylla*)和试验结果却不一样,不同试验材料的遗传学特性可能是导致结果差异的原因之一。相同的试验材料(*Pinus resinosa*),容器体积(70 cm^3)和时间(12 周)前提下,Timmer 和 Armstrong^[25] 采用的施肥方法为“100:13:65 (N-P-K)”,并且其所得到的结论和大部分前人研究相符;而 Miller 和 Timmer^[28] 采用的施肥方法为“20-20-20”,不同的施肥方法也可能是导致 Miller 和 Timmer^[28] 的试验结果与前人研究不同的主要原因。

人们普遍认为,在营养亏缺范围内植物的相对生长速率与相对营养添加速率几乎相等^[6],即在达到最适营养物质相对添加速率前幼苗的相对生长速率与营养物质添加速率呈正相关,过量后随着营养物质相对添加速率的提高幼苗相对生长速率下降^[29]。可见,在营养亏缺范围内,最适养分添加速率可以利用线性方程进行拟合计算,即 $V = \Delta F / \Delta D$ ^[29],其中 V 为养分最适添加速率; ΔF 为养分添加量; ΔD 为养分添加天数。本次研究结果表明,在 103d 当 E1 的累计施肥量为 19.30 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (表 1)时,苗木生物量积累高达 637.80 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (图 1),N 含量和 N 利用效率分别为 8.10 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 41.77%(图 2),之后生物量与 N 含量不再随着 N 的继续添加而增加(图 1A,图 2A);在播种后第 87 天当 E3 的累计施肥量为 22.21 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (表 1)时,生物量积累为 214.10 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (图 1),N 含量和 N 利用效率分别为 3.85 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 31.27%(图 2),之后生物量与 N 含量不再随着 N 的继续添加而增加(图 1A,图 2A)。可见,如果以供 N 总量为 30 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 的方法进行施肥处理,在 103d 苗木达到饱和需养水平并可以获得较高的生物量积累水平和养分利用效率。而如果采用供 N 总量为 70 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 的指数施肥方法,在 87d 时苗木便已达到了养分饱和状态,但是生物量积累水平和养分利用效率都比较低。利用最适 N 添加速率公式不难求出对于长白落叶松播种苗最适 N 添加速率为 0.29 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。但是,由于本次试验只进行了 5 次收获调查,关于饱和需养水平的时间的探讨还不够精确,并且由于本次试验缺少对于土壤养分有效性的观察,因此其结果的准确性还有待进一步研究验证。

致谢: 感谢加拿大 Victoria 大学的 Barbara J Hawkins 女士对本文英文摘要的润色和对文章内容的建议。

References:

- [1] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur?. *Biogeochemistry*, 1991, 13 (2): 87-115.
- [2] Cassman K G, Kropf M J, Graunt J, Peng S. Nitrogen use efficiency of rice reconsidered: what are the key constraints? *Plant and Soil*, 1993, 155-156 (1): 359-362.
- [3] Juntunen M L, Hammar T, Rikala R. Leaching of nitrogen and phosphorus during production of forest seedlings in containers. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6): 1868-1874.
- [4] Juntunen M L, Hammar T, Rikala R. Nitrogen and phosphorus leaching and uptake by container birch seedlings (*Betula pendula* Roth) growth in three different fertilizations. *New Forests*, 2003, 25 (2): 133-147.
- [5] 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. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35 (4): 1002-1016.
- [6] Ingestad T, Lund A B. Theory and techniques of steady-state mineral nutrition and growth of plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1986, 1: 439-453.
- [7] Imo M, Timmer V R. Nitrogen uptake of mesquite seedlings at conventional and exponential schedules. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56 (3): 927-934.
- [8] Imo M, Timmer V R. Vector diagnosis of nutrient dynamics in mesquite seedlings. *Forest Science*, 1997, 43 (2): 1-6.
- [9] Quoreshi A M, Timmer V R. Early outplanting performance of nutrient-loaded containerized black spruce seedlings inoculated with *Laccaria bicolor*: a bioassay study. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30 (5): 744-752.
- [10] Dumroese R K, Page-Dumroese D S, Salifu K F, Jacobs D F. Exponential fertilization of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency,

- leaching fractions, and early outplanting performance. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35 (12): 2961-2968.
- [11] Timmer V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites. New Forests, 1997, 13 (1/3): 279-299.
- [12] Salifu K F, Jacobs D F, Birge Z K D. Performance of nutrient-loaded red oak and white oak seedlings on mine lands in southern Indiana// Dumroese R K, Riley L E, technical coordinators. National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2007. Fort Collins (CO): USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2008, Proceedings RMRS-P-57:65-71.
- [13] Salifu K F, Jacobs D F, Birge Z K D. Nursery nitrogen loading improves field performance of bareroot oak seedlings planted on abandoned mine lands. Restoration Ecology, 2009, 17 (3): 339-349.
- [14] 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. Canadian Journal of Forest Research, 2007, 37 (12): 2552-2562.
- [15] Zhou L X, Liu G P. Effect of fertilization on nutrient concentration of organs for Korean Pine and larch seedlings. Journal of Northeast Forestry University, 2004, 32 (1): 19-23.
- [16] Timmer V R, Armstrong G, Miller B D. Steady-state nutrient preconditioning and early outplanting performance of containerized black spruce seedlings. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 21 (5): 585-594.
- [17] Qureshi A M, Timmer V R. Exponential fertilization increases nutrient uptake and ectomycorrhizal development of black spruce seedlings. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28 (5): 674-682.
- [18] Olie A J, Tejada M, Salifu K F. Performance and nutrient dynamics of holm oak (*Quercus ilex* L.) seedlings in relation to nursery nutrient loading and post-transplant fertility. European Journal of Forest Research, 2009, 128 (3): 253-263.
- [19] Qu L, Qureshi A M, Koike T. Root growth characteristics, biomass and nutrient dynamics of seedlings of two larch species raised under different fertilization regimes. Plant and Soil, 2003, 255 (1): 293-302.
- [20] McAlister J A, Timmer V R. Nutrient enrichment of white spruce seedlings during nursery culture and initial plantation establishment. Tree Physiology, 1998, 18 (3): 195-202.
- [21] Miller B D, Timmer V R. Nutrient dynamics and carbon partitioning in nutrient loaded *Picea mariana* (Mill.) B. S. P. seedlings during hardening. Scandinavian Journal of Forest Research, 1997, 12 (2): 122-129.
- [22] Salifu K F, Timmer V R. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33 (7): 1287-1294.
- [23] Xu X J, Timmer V R. Biomass and nutrient dynamics of Chinese fir seedlings under conventional and exponential fertilization regimes. Plant and Soil, 1998, 203 (2): 313-322.
- [24] Xu X J, Timmer V R. Growth and nitrogen nutrition of Chinese fir seedlings exposed to nutrient loading and fertilization. Plant and Soil, 1999, 216 (1/2): 83-91.
- [25] Timmer V R, Armstrong G. Growth and nutrition of containerized *Pinus resinosa* at exponentially increasing nutrient additions. Canadian Journal of Forest Research, 1987, 17 (7): 644-647.
- [26] Boivin J R, Miller B D, Timmer V R. Late-season fertilization of *Picea mariana* seedlings under greenhouse culture: biomass and nutrient dynamics. Annals of Forest Science, 2002, 59 (3): 255-264.
- [27] Burgess D. Western hemlock and Douglas-fir seedling development with exponential rates of nutrient addition. Forest Science, 1991, 37 (1): 54-67.
- [28] Miller B D, Timmer V R. Steady-state nutrient of *Pinus resinosa* seedlings: response to nutrient loading, irrigation and hardening regimes. Tree Physiology, 1994, 14 (12): 1327-1338.
- [29] Zheng H M, Jia H J. Study and prospects of theory and techniques for steady-state mineral nutrition of plants. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35 (1): 94-104.

参考文献:

- [15] 周利勋, 刘广平. 施肥对红松和落叶松幼苗各器官养分含量的影响. 东北林业大学学报, 2004, 32 (1): 18-22.
- [29] 郑槐明, 贾慧君. 植物稳态矿质营养理论与技术研究及展望. 林业科学, 1999, 35 (1): 94-104.