

施肥对长白落叶松苗木养分库氮磷吸收及利用的影响

康瑶瑶 刘勇 马履一 李国雷 祝燕 马跃

(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)

摘要:为探讨传统施肥量是否使出圃长白落叶松苗木体内养分达到养分奢养阶段,以长白落叶松1年生播种苗为实验材料,设定不同施肥量实验,对2年生移栽苗木的生物量、N和P的养分浓度及含量进行检验,并结合养分吸收利用效率和N、P的矢量情况进行分析。结果表明:2种施肥量处理对其养分库和全株的生物量($P_{\text{养分库}} = 0.0285$; $P_{\text{全株}} = 0.0325$)、P的养分浓度($P_{\text{养分库}} = 0.0022$; $P_{\text{全株}} = 0.0418$)及P的含量($P_{\text{养分库}} = 0.0043$; $P_{\text{全株}} = 0.0301$)影响显著,且存在生物量和N素向养分库转移的现象,养分吸收利用参数值均较低。矢量分析结果显示,整株和养分库中N素均处于养分缺乏状态,而P素处于养分稀释状态。建议生产部门对其传统施肥方式进行转变,对其生长季中指数施N肥和晚季追施P肥,以使苗木达到奢养的阶段,同时利用苗木养分库的大小来预测苗木造林的表现。

关键词:长白落叶松;养分承载;养分库;氮;磷

中图分类号:S723.7;S725.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2011)02-0031-06

KANG Yao-yao; LIU Yong; MA Lü-yi; LI Guo-lei; ZHU Yan; MA Yue. Effects of fertilization on uptake and availability of N and P nutrient pool of *Larix olgensis* seedlings. *Journal of Beijing Forestry University* (2011) 33(2) 31-36 [Ch, 28 ref.] College of Forestry, Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

In order to explore luxury nutrient uptake of the seedlings prior to field planting under conventional fertilizing regimes, *Larix olgensis* seedlings (one-year old) were selected as materials. Biomass, concentrations and contents of N and P of two-year old seedlings were tested under different fertilization treatments. The nutrient use efficiency and vector nomogram of N and P were also analyzed. The results show that the amount of fertilizer significantly affected the biomass ($P_{\text{pool}} = 0.0285$; $P_{\text{intact}} = 0.0325$), P concentration ($P_{\text{pool}} = 0.0022$; $P_{\text{intact}} = 0.0418$) and P content ($P_{\text{pool}} = 0.0043$; $P_{\text{intact}} = 0.0301$). Biomass and nitrogen transferring to nutrient pool occurred with low values of nutrient use efficiency. Vector analysis indicated that N deficiency and P in dilution status were observed in both nutrient pool and intact seedlings. In order to induce luxury nutrient uptake of seedlings, fertilization regimes should be optimized by conducting both exponential N nutrient loading during growth period and fertilization of P in late-season. Simultaneously, nutrient pool strength could be selected as an indicator for seedling performance after planting.

Key words *Larix olgensis*; nutrient loading; nutrient pool; N; P

苗木质量作为影响造林成活率的关键因素,历来受到人们的广泛关注^[1-3]。国外近些年对于苗木质量的研究不仅涉及地上部分的形态和整株的生理活力^[1],更注重关于苗木养分库的问题^[2-4]。有研

究表明,由于造林地的土壤肥力低下和竞争影响,针叶苗木出圃后造林的成活率较低^[5-6]。养分库的大小直接关系到移栽后苗木养分再转运的水平,进而影响苗木的造林表现,因此,对苗木出圃后造林成活

收稿日期:2010-06-10

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD24B01)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(BLJD200905)。

第一作者:康瑶瑶,博士生。主要研究方向:苗木培育理论与技术。电话:010-62391696 Email:kyy0922@163.com 地址:100083北京市清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者:刘勇 教授,博士生导师。主要研究方向:森林培育理论与技术。电话:010-62338994 Email:lyong@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址:<http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

率较低这一问题的有效解决方法之一是对苗木进行养分加载,提高苗木养分库的水平^[7]。

随着供养量的增加,苗木体内养分状况依次分为贫养、奢养、毒害3个阶段。贫养表现为生物量、养分含量、养分浓度都增加;奢养为生物量没有显著变化,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^[4]。在以上任一阶段的过程中,苗木随时还可能发生养分稀释,即生物量和养分含量上升,而养分浓度却下降的现象,但多发生在苗木生长季中的硬化期^[8-9]。目前,有研究认为,苗木最佳养分状况是在奢养阶段,即苗木体内养分含量高,但生物量没有显著变化^[10-11]。加拿大在选择造林苗木时已倾向于使用养分含量高的苗木^[8]。然而,我国在进行苗木质量评价时,忽略了把苗木的养分状况作为筛选高质量苗木的指标。

在北半球,由于落叶现象导致叶片养分流失,落叶松属是一类典型的需养量较大的树种^[12]。长白落叶松(*Larix olgensis* Henry)是我国东北地区常用的造林树种,具有很高的生态价值和商业价值。吉林地区对该树种在苗圃阶段大田裸根苗进行2年传统施肥的方法为:播种前底施磷酸二铵并追施尿素,翌年换床移栽前底施磷酸二铵后不再追肥。近年来,该传统施肥方法下的出圃苗木出现了质量低下、造林表现差和造林后生长速率慢等问题。笔者认为其原因可能是培育阶段苗木的养分利用效率低下,导致造林时苗木体内的养分储藏不足。针对这个问题,本文以长白落叶松1年生播种苗为实验材料,在移栽后,利用传统施肥方法开展试验,同时提出假设:1)传统施肥方法能够使得苗木达到奢养阶段^[4];2)在传统施肥方法下能够找到最适供养量。

1 实验材料与方法

1.1 实验地概况和供试材料

研究地点位于吉林省龙潭区江密峰苗圃(126°45' E 43°45' N)。实验地区为温带大陆性季风气候,全年平均气温3~5℃,1月份平均气温-20~-18℃,7月份平均气温21~23℃;全区年降水量650~750 mm,有效积温≥10℃,全区日照时数2 400~2 600 h。土壤为暗棕壤,0~20 cm土层全N含量1.94 g/kg、速效P含量226.17 mg/kg, pH值6.17。

参试肥料为磷酸二铵(含N 18%,含P 20%)和尿素(含N 46%)。供试材料为2007年该苗圃培育的同一批长白落叶松1年生播种苗:常规播种培育阶段共施入N 38.8 mg/株,施P 12.0 mg/株。供试

苗高(15.0 ± 0.35) cm,地径(1.64 ± 0.14) mm。

1.2 实验设计

实验采用随机区组设计。共设3种处理:CK(不施肥)、T1(N含量82.2 kg/hm²,P含量91.6 kg/hm²)、T2(N含量246.5 kg/hm²,P含量274.9 kg/hm²)。其中,T1为传统施肥量;为检测T1是否能使苗木体内养分达到奢养状态,T2设为大量施肥处理,其施肥量约是T1的3倍。若T1能使苗木养分达到奢养阶段,则T2应在奢养或毒害阶段。

1.3 实验方法

于2008年4月17日整地、划分小区,小区面积1.0 m × 1.0 m(长×宽),四周埋入60 cm深塑料布,每处理6个重复。把肥料均匀撒施入表土以下10 cm处,然后进行苗木移栽,移栽密度为5 cm × 10 cm(株距×行距)。苗木日常管理方法与苗圃生产一致。于2008年9月25日(晚季落叶前)在苗床中央区域随机挑选15株长势均一的苗木进行收获取样。用清水小心洗去根系表面泥土后,用蒸馏水润洗,遂用冰盒(0~4℃)带回实验室待测。

1.4 指标测定

将苗木分为叶、茎和根3部分,分别放入烘箱内以70℃烘干48 h,遂测定各部分生物量。将烘干后的样品粉碎、过0.25 mm筛、充分混合。本次实验以茎和根的总体作为养分库,称其生物量后测定其养分含量(茎养分含量+根养分含量)和养分浓度(养分含量/生物量)。用硝酸—高氯酸消煮^[13]后以原子吸收光谱仪(VARIN AA 220 Elemental Spectroscopy)测定P浓度。为测定包括NO₃在内的全N,用KMnO₄-Fe-H₂SO₄法将植物样品消煮^[14]后,以Kjeldahl法测定植物N^[15]浓度。养分含量由相应养分浓度乘以生物量得到。

1.5 数据分析及处理

本次实验采用以下养分参数^[16-17]作为结果。

施肥效率(FE):

$$FE = \frac{B_1 - B_0}{F}$$

式中:B₁和B₀分别为结束调查日和起始调查日的生物量,F为调查期间N或P的供养总量。

表现吸收效率(AUE):

$$AUE = \frac{C_F - C_{con}}{F}$$

式中:C_F为调查期间施肥处理下苗木养分增量,C_{con}为调查期间CK处理苗木养分增量;F为调查期间N或P的供养总量,则AUE为N的表现吸收效率(AUE_N)或P的表现吸收效率(AUE_P)。

收获指数(BYI或NYI):

$$\text{BYI 或 NYI} = \frac{Y}{F}$$

式中:BYI为生物量收获指数,NYI为养分收获指数;Y为收获苗木生物量或养分含量;BYI中的F为N和P的供养总量,NYI中的F为N的供养总量或P的供养总量;NYI为N的收获指数(NYI_N)或磷的收获指数(NYI_P)。

数据记录和整理采用Excel 2003软件。利用SPSS 15.0进行包括平均值、标准差($\alpha=0.05$)的单因素方差分析。矢量诊断结果类型(Shift)的含义与Salifu等^[4]的研究一致,T1为参照点,将结果分为N和P的矢量分析,矢量图利用SigmaPlot 11.0制作。

2 结果与分析

2.1 不同处理下生物量、养分浓度和含量的响应

由表1可以看出,T2的生物量、N浓度、N含量和P含量均高于T1。但是2个处理下苗木各生物量指标中只有养分库和全株间分别有显著性差异($P=0.0285$; $P=0.0325$)。其中,T2的全株生物量比T1显著增加47.8%($P=0.0325$)。与T1相比,T2增加的生物量分配给茎的比例最高(51.5%,1.06 g/株)、叶的比例最少(45.0%,0.86 g/株)。可见,T2使得更多的生物量分配至茎中,即其具有更偏向分配至养分库的趋势。

T2的茎、根、养分库和全株的N浓度均显著高于T1($P_{\text{茎}}=0.0022$; $P_{\text{根}}=0.0295$; $P_{\text{养分库}}=0.0022$; $P_{\text{全株}}=0.0418$),例如,T2的全株N浓度比T1显著高出13.6%($P=0.0461$)。类似地,T2的N含量表现出和N浓度相同的规律($P_{\text{茎}}=0.0223$; $P_{\text{根}}=0.0034$; $P_{\text{养分库}}=0.0043$; $P_{\text{全株}}=0.0301$)。从分配上看,T2比T1增加的N量更多地向茎中分配,表现

出茎>根>叶的趋势。可见,T2的N养分更容易向养分库中累积。

2种处理下各部分器官的P含量均是T2最大,但是相应部位的P浓度却表现为T1最大,且各部位P的浓度和含量差异均不显著。

2.2 养分的吸收和利用

AUE是养分吸收情况的参数表示,而FE、BYI和NYI是养分利用情况的3种参数表示。由表2可以看出:T2的FE、AUE_N值均高于T1,其中AUE_N在养分库中的表现显著,比T1高出70.3%($P=0.0120$)。这说明增加施肥量会有效提高苗木N的表观吸收效率。由于T2的供肥量较大,收获指数无论生物量还是养分含量均表现出T2小于T1,且在BYI的养分库($P=0.0340$)和全株($P=0.0390$)中均达到显著差异水平。同样,NYI_P也呈相同的规律($P_{\text{养分库}}=0.0300$; $P_{\text{全株}}=0.0300$),但是NYI_N的结果差异不显著($P_{\text{养分库}}=0.1850$; $P_{\text{全株}}=0.2470$),这可能是由于其N素的表观养分吸收效率在T2时高的缘故。2种处理下,全株N素的表观养分利用效率分别为32.41%和36.15%,施肥效率为2.51和4.13,生物量收获指数为20.41和11.43,参数整体都偏低。

2.3 矢量分析

矢量分析法是在1张二维坐标图(横坐标:养分含量;纵坐标:养分浓度)中引入辅助坐标轴(Z轴:生物量),分别绘制诊断对象的养分状况矢量线,根据矢量的大小和方向判断各营养元素的状况。当生物量、养分含量、养分浓度三者同时增加时,表明植株仍有提高生长速度的潜力,养分供应受到限制,属于贫养阶段(类型C)。当生物量、养分含量与参照点比较增高,而养分浓度下降时,表明养分吸收量比生物量增加速度慢,表现为养分的稀释状态(类型A)^[4]。

表1 长白落叶松苗木生物量和N、P含量及浓度对不同施肥处理的响应

Tab. 1 Responses of biomass, contents and concentrations of N and P of *L. olgensis* seedlings to different fertilization treatments

指标	处理	叶	茎	根	养分库	全株
生物量/(g·株 ⁻¹)	CK	1.63±0.52a	1.91±0.62a	1.82±0.40a	3.73±0.98a	5.36±1.50a
	T1	1.91±0.48a	2.06±0.48a	1.73±0.37a	3.79±0.84a	5.69±1.32a
	T2	2.77±0.62a(45.0%)	3.12±0.74a(51.5%)	2.51±0.17a(45.1%)	5.63±0.89b(48.5%)	8.41±1.49b(47.8%)
N浓度/(mg·g ⁻¹)	CK	1.33±0.08a	0.91±0.03a	0.98±0.06a	1.89±0.07a	3.21±0.04a
	T1	1.37±0.29a	1.00±0.03a	1.02±0.08a	2.02±0.09a	3.39±0.38a
	T2	1.44±0.16a(5.1%)	1.20±0.09b(20%)	1.21±0.11b(18.6%)	2.42±0.15b(19.8%)	3.85±0.18b(13.6%)
N含量/(mg·株 ⁻¹)	CK	21.82±7.76a	17.43±5.59a	17.68±3.31a	35.11±8.31a	56.93±16.05a
	T1	30.17±9.15a	20.54±4.22a	19.69±3.35a	40.23±5.93a	70.40±14.04a
	T2	40.54±13.82a(34.4%)	37.45±9.35b(82.3%)	30.41±1.65b(54.4%)	67.86±8.79b(68.7%)	108.40±22.61b(54.0%)
P浓度/(mg·g ⁻¹)	CK	0.21±0.07a	0.24±0.02a	0.21±0.03a	0.45±0.04a	0.66±0.10a
	T1	0.24±0.07a	0.24±0.04a	0.27±0.02a	0.51±0.02a	0.75±0.08a
	T2	0.21±0.03a(-12.5%)	0.20±0.03a(-16.7%)	0.22±0.01a(-18.5%)	0.42±0.04a(-17.6%)	0.63±0.05a(-16.0%)
P含量/(mg·株 ⁻¹)	CK	3.24±0.24a	4.45±1.27a	3.83±1.03a	8.28±2.30a	11.52±2.54a
	T1	4.52±1.33a	5.04±1.69a	4.57±0.94a	9.61±2.40a	14.13±3.32a
	T2	5.97±2.05a(32.1%)	6.22±2.44a(23.4%)	5.56±0.64a(21.7%)	11.78±2.92a(22.6%)	17.75±4.86a(25.6%)

注:表中数据为平均值±标准差;括号内数值为T2比T1的增量百分比。同列不同小写字母表示相对应的测定指标差异显著($P<0.05$)。下同。

表2 常量和大量施肥处理下长白落叶松苗木N、P利用效率间的差异

Tab. 2 Differences between N and P use efficiencies of *L. olgensis* seedlings under two fertilization regimes

部位	处理	FE	AUE _N /%	AUE _P /%	BYI	NYI _N /%	NYI _P /%
养分库	T1	1.14 ± 1.07a	11.87 ± 0.18a	3.54 ± 2.86a	13.57 ± 3.01a	50.36 ± 7.43a	16.61 ± 4.16a
	T2	2.58 ± 1.03a	20.21 ± 3.34b	2.34 ± 0.49a	7.66 ± 1.21b	41.87 ± 5.42a	7.88 ± 1.95b
全株	T1	2.51 ± 1.80a	32.41 ± 0.53a	4.51 ± 3.41a	20.41 ± 4.73a	78.23 ± 3.94a	24.43 ± 5.75a
	T2	4.13 ± 1.50a	36.15 ± 3.10a	4.17 ± 1.71a	11.43 ± 2.03b	66.89 ± 13.95a	11.87 ± 3.25b

图1(左)是苗木N素的养分矢量列线图。由图1(左图)可以看出:T2提高了全株的生物量($P = 0.0325$)、N含量($P = 0.0301$)和N浓度($P = 0.0418$);N的养分库表现也是T2在这几方面显著高于T1($P_{\text{全株生物量}} = 0.0285$; $P_{\text{N含量}} = 0.0043$; $P_{\text{N浓度}} = 0.0022$)。因此,由T1指向T2的向量全株和养分库均符合类型C^[4],这表明仅靠增施基肥量使得N养分供给不足,处在贫养阶段上,这与假设T1已达到奢养阶段不符。图1(右图)是P素的养分矢量列线图。由图1(右图)可以看出:P的养分

库和全株的矢量图表现出与N素相反的趋势,从T1到T2,生物量和P的养分含量在增大,但是其浓度却都表现出下降的趋势。例如T2相对于T1,使得全株生物量和P含量分别上升了47.8%和25.6%,养分浓度下降了16%;使得养分库生物量和P含量分别上升了48.5%和22.6%,养分浓度下降了17.6%。这表明了由T1指向T2的向量均符合类型A,P在增施基肥量时存在养分稀释现象^[4],说明该阶段P素的供给满足不了苗木的吸收。

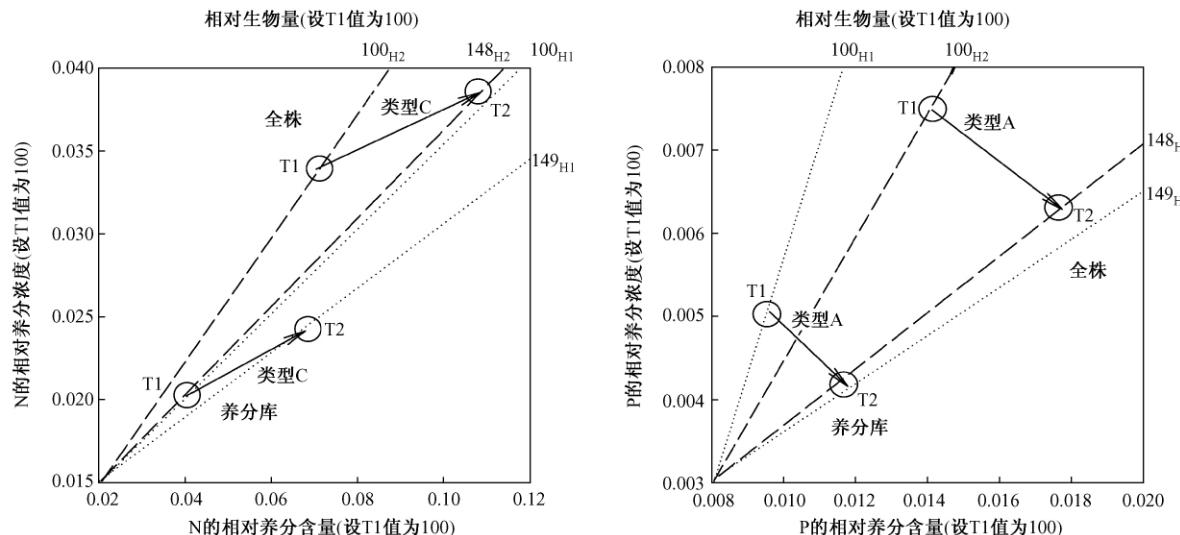


图1 T1、T2 处理下苗木N、P养分库和全株的生物量、养分含量和养分浓度相对变化的矢量列线图

Fig. 1 Vector nomogram of relative changes in seedling biomass, nutrient contents and concentrations under two fertilization regimes

注:H1、H2 分别代表养分库和全株。

3 结论与讨论

长白落叶松苗木表现出生物量和N素均向养分库转移的特点,这是对翌年造林表现的一种积极响应。当供养量大时,苗木偏好于在晚季向茎和根中分配更多的生物量,这可能是该树种对北半球晚季日照时数缩短的一种响应机制。当植物受到光照或养分条件的限制时,会通过适当改变其生物量分配来提高其适合度和竞争能力^[18]。本研究中的树种为落叶树种,收获时已经属于晚季,日照时数相对生长季中大大缩短,为响应环境的变化,在供养量大的处理下,其生物量的分配在叶中减小,更多的积聚在养分库中(见表1)。长白落叶松在晚季收获时,

因该阶段叶片不再进行光合作用来消耗养分,其主要参与光合作用的N素,在供N量大的情况下,N素也呈现与生物量相同的趋势,即叶片中的N素减少并向养分库中聚集,同时显著提高了苗木养分库中N的表观吸收效率(见表2)。但是P素在供养量大的处理下,各器官的生物量和P素的表观养分吸收效率均表现出差异不显著。这可能是P易被土壤固定,虽然施肥量增大,但实际吸收量未必增大。

长白落叶松苗木在2种施肥处理下均表现出收获效率、表观养分吸收效率和收获都不高的情况,这与实验中假设传统施肥量下苗木已达到奢养阶段时的结果是矛盾的。美国黄松(*Pinus ponderosa*)造林

前 N 素达到奢养阶段的苗木比未奢养的苗木针叶内 N 的养分含量提高 11.9% ,生物量提高 6% ,使其对应参数有升高的趋势^[19]。加拿大的白云杉 (*Picea glauca*) ,在 N 素到达奢养阶段的情况下 ,N 的表观养分利用效率可达到 87.3% ,收获指数达到 30.5^[20] ,相应的参数也远远高于本实验。这表明本文的实验处理可能还未达到奢养阶段 ,与假设不符。

从苗木生物量、养分浓度、养分含量三者之间的矢量关系来看(图 1) ,长白落叶松苗木在传统施肥量下苗木体内 N、P 分别处于贫养和稀释状态。由于生产上本着“肥大即好”的指导思想 ,实际上 ,传统施肥量已经属于大量施肥。因此 ,从苗木体内养分状况的角度来看 ,长白落叶松苗木质量低下的问题 ,我们推测不是施肥量的问题 ,而是由于现在的传统施肥方式不合理所致 ,即对移栽苗只进行基肥而不追肥的施肥方法所致。对此 ,我们建议对苗木的施肥方式进行转变 ,进而达到养分奢养阶段^[8-9]。Timmer^[21]认为达到养分奢养的途径有 3 个:秋季施肥、整个生长季大量施肥和指数施肥。国内相关研究已体现在秋季施肥和指数施肥上^[22-23]。针对长白落叶松苗木的培育 ,在考虑该实验地区土壤营养状态、苗木密度、调查样本大小的情况下 ,我们建议:1)在苗木生长季内以指数形式进行稳态养分添加。这在国外的裸根苗培育中已经得到成功印证 ,例如加拿大的白云杉。如传统模式改用苗木生长季中指数施肥 ,N 素可以在造林前达到奢养阶段^[20] ,美国的红栎 (*Quercus rubra*) 和白栎 (*Q. alba*) 也是如此^[11]。2)在晚季追施养分。晚季施 P 肥使植物体内 P 浓度显著增加的研究在国外已有报道 ,如瑞典的沼地植被在晚季施入 P 肥能使体内 P 浓度显著升高^[24] ,但是近些年苗木晚季施肥的研究多集中在 N 和 K 的研究上。红松 (*Pinus resinosa*) 苗木在晚季追施 N 肥后 ,可使出圃造林苗木体内 N 的养分含量显著提高 ,使苗木造林后比常规施肥处理表现要好^[25] 美国的火炬松 (*Pinus taeda*) 、加拿大的黑云杉 (*Picea mariana*) 进行晚季施 N 处理后的结果也是如此^[8-26]。同样 ,花旗松 (*Pseudotsuga menziesii*) 晚季施入 K 肥也使苗木体内避免了 K 的养分稀释 ,并使养分达到奢养阶段^[27]。

另外 ,由于造林前苗木体内高养分库水平能有效提高造林后苗木叶片的光合效率^[8] ,同时长白落叶松苗木需养量较大^[12,17] ,我们认为该苗木出圃养分库强度对其造林表现可能有显著影响。这种观点言之有据 ,例如 ,养分库在造林前 N 素含量分别为 203.3 和 51.8 mg/株的白云杉 ,前者在造林 145 d 后较后者的全株生物量高出 75%^[28]。也有学者认

为 ,如提高西部铁杉 (*Tsuga heterophylla*) 造林前苗木体养分含量 ,其在造林后会表现出根系生长发育快和竞争力提高等特征 ,并快速适应造林地环境^[10]。因此 ,我们建议将出圃苗木养分库强度作为衡量苗木质量的参考标准之一 ,并用来预测苗木造林后的表现。

参 考 文 献

- [1] DAVIS A S , JACOBS D F. Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance [J]. *New Forests* , 2005 , 30: 295-311.
- [2] WAY D A , SEGOBIN S D , SAGE R F. The effect of carbon and nutrient loading during nursery culture on the growth of black spruce seedlings: A six-year field study [J]. *New Forests* , 2007 , 34: 307-312.
- [3] OLIET J A , TEJADA M , SALIFU K F , et al. Performance and nutrient dynamics of holm oak (*Quercus ilex* L.) seedlings in relation to nursery nutrient loading and post-transplant fertility [J]. *European Journal of Forest Research* , 2009 , 128: 253-263.
- [4] SALIFU K F , TIMMER V R. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture [J]. *Canadian Journal of Forest Research* , 2003 , 33: 1287-1294.
- [5] MAIKE V , TIMMER V R. Growth ,nutrient dynamics ,and inter-specific competition of nutrient-loaded black spruce seedlings on a boreal mixedwood site [J]. *Canadian Journal of Forest Research* , 1996 , 26: 1651-1659.
- [6] JOBIDON R , CHARETTE L , BERNIER P Y. Initial size and competing vegetation effects on water stress and growth of *Picea mariana* (Mill.) BSP seedlings planted in three different environments [J]. *Forest Ecology and Management* , 1998 , 103: 293-305.
- [7] SALIFU K F , TIMMER V R. Nutrient retranslocation response of *Picea mariana* seedlings to nitrogen supply [J]. *Soil Science Society of American Journal* , 2001 , 65: 905-913.
- [8] BOIVIN J R , SALIFU K F , TIMMER V R. Late-season fertilization of *Picea mariana* seedlings: Intensive loading and outplanting response on greenhouse bioassays [J]. *Annals of Forest Science* , 2004 , 61: 737-745.
- [9] BOIVIN J R , MILLER B D , TIMMER V R. Late-season fertilization of *Picea mariana* seedlings under greenhouse culture: Biomass and nutrient dynamics [J]. *Annals of Forest Science* , 2002 , 59: 255-264.
- [10] 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]. *Canadian Journal of Forest Research* , 2005 , 35: 1002-1016.
- [11] BIRGE Z K D , SALIFU K F , JACOBS D. Modified exponential nitrogen loading to promote morphological quality and nutrient storage of bareroot-cultured *Quercus rubra* and *Quercus alba* seedlings [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research* , 2006 , 21: 306-316.

- [12] GOWER S T , RECHARDS J H. Larches: Deciduous conifers in an evergreen world [J]. *BioScience* , 1990 , 40: 818—826.
- [13] ZASOSKI R J , BURAU R G. A rapid nitric-perchloric acid digestion method for multi-element tissue analysis [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* , 1977 , 8: 425—436.
- [14] BREMNER J M. Methods of soil analysis [M]. Madison ,WI: ASA and SSSA , 1965.
- [15] 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 [J]. *New Forests* , 2007 , 34: 163—174.
- [16] ROBERTS T L. Improving nutrient use efficiency [J]. *Turkey Journal of Agricultural Forestry* , 2008 , 32: 177—182.
- [17] GUO S L , YAN X F , BAI B , et al. Carbon and nitrogen acquisition and allocation in larch seedlings in response to different N supply rates [J]. *Acta Phytocologica Sinica* , 2005 , 29(4) : 550—558.
- [18] WU G L , DU G Z , CHEN M , et al. Response of seedling root of six herbaceous species to light and nutrient in alpine meadow of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Botany* , 2006 , 2(4) : 395—401.
- [19] GLEASON J F , DURYEA M L , ROSE R. Nursery and field fertilization of 2 + 0 ponderosa pine seedlings: The effect on morphology , physiology and field performance [J]. *Canadian Journal of Forest Research* , 1990 , 20: 1766—1772.
- [20] MCALISTER J A , TIMMER J A. Nutrient enrichment of white spruce seedlings during nursery culture and initial plantation establishment [J]. *Tree Physiology* , 1998 , 18: 195—202.
- [21] TIMMER V R. Exponential nutrient loading: A new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites [J]. *New Forests* , 1997 , 13: 279—299.
- [22] 刘勇,陈艳,张志毅,等.不同施肥处理对三倍体毛白杨苗木生长及抗寒性的影响[J].北京林业大学学报,2000,22(1):38—45.
- [23] 刘洲鸿,刘勇,段树生.不同水分条件下施肥对侧柏苗木生长及抗旱性的影响[J].北京林业大学学报,2002,24(6):56—60.
- [24] DIRK B , BART V , HAESEBROECK V. Phosphorus fertilization in a phosphorus-limited fen: Effects of timing [J]. *Applied Vegetation Science* , 1999 , 2: 71—78.
- [25] ISLAM M A , APOSTOL K G , JACOBS D F , et al. Fall fertilization of *Pinus resinosa* seedlings: Nutrient uptake , cold hardiness , and morphological development [J]. *Annals of Forest Science* , 2009 , 66: 704.
- [26] VANDERSCHAAF C , MCNABB K. Winter nitrogen fertilization of loblolly pine seedlings [J]. *Plant Soil* , 2004 , 265: 295—299.
- [27] BIRCHLER T M , ROSE R , HAASE D. Fall fertilization with N and K: Effects on Douglass-fir seedling quality and performance [J]. *Western Journal of Applied Forestry* , 2001 , 16: 71—79.
- [28] MALIK V , TIMMER V R. Biomass partitioning and nitrogen retranslocation in black spruce seedlings on competitive mixed wood sites: A bioassay study [J]. *Canadian Journal of Forest Research* , 1998 , 28: 206—215.

(责任编辑 冯秀兰)