

长白落叶松高固碳种源选择研究

贾庆彬, 张含国*, 姚宇, 朱航勇

(林木遗传育种国家重点实验室(东北林业大学), 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:以东北林业大学帽儿山试验林场 31 年生长白落叶松种源试验林为研究对象。首先对林木碳储量研究中非破坏性取样方法进行探究, 通过对比树干 1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率数据, 发现二者存在较强的线性关系, 利用回归分析计算出直线方程 $y = 0.9082x + 4.3794$, $R^2 = 0.8425$, 方程拟合程度达到理想水平, 利用 1.3 m 处木芯样品含碳率推算树干平均含碳率方法可行。对不同种源长白落叶松的生长、材性、含碳率、干材生物量、碳储量等性状进行测定, 结合方差分析、多重比较、相关分析等数理统计方法, 最终筛选出生长优良, 固碳能力强的种源。结果显示: 干材生物量与碳储量存在较丰富的变异, 平均变异系数分别为 21.33% 和 21.30%。相关分析结果显示, 碳储量与生长性状、干材生物量呈极显著正相关, 与综纤维素含量和木质素含量相关不显著。通过方差分析与 Duncan 法多重比较, 最终选择出小北湖与白刀山两个种源为高固碳能力种源。小北湖与白刀山种源单株干材碳储量分别为 74.38 kg 和 69.27 kg, 二者平均值高出总平均值 27.83%, 比对照 CK 高出 54.45%。以现有试验林为标准, 若选择小北湖种源, 则每公顷固碳 27 297.46 kg, 比利用碳储量最小的露水河种源造林每公顷固碳量高 47.85%。

关键词:长白落叶松; 生长性状; 碳储量; 相关分析; 种源选择

中图分类号: S791.22 S722.5

文献标识码: A

High Carbon Content Larch (*Larix olgensis*) Provenances Selection

JIA Qing-bin, ZHANG Han-guo, YAO Yu, ZHU Hang-yong

(National Key Laboratory of Forest Tree Improvement and Biotechnology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: Taking 31-year-old larch (*Larix olgensis*) provenance test plantation as object, the non-destructive sampling method was used to compare the carbon content of wooden core sample at the height of 1.3 m and the average carbon content of the whole trunk. It was found that there was an obvious linear relationship between them. By regression analysis, a linear equation, $y = 0.9082x + 4.3794$, R^2 is 0.8425, was derived. The fitting degree of the equation reached the desired level. The result showed that the average rate of carbon content in trunk could be calculated by using the carbon content of wood core sample at the height of 1.3 m. The analysis methods used in this study include variance analysis, multiple comparisons and correlation analysis. The superior provenances of high carbon content were selected and the variations in growth traits, timber characters, biomass of trunk and carbon content were analyzed. The results showed that variation in biomass and carbon content of the wood were significant, the coefficients of variations for both were 21.33% and 21.30%. The results of correlation analysis showed that the carbon content was significantly and positively correlated with the growth traits and biomass. According to these results, the authors analyzed the data by the theory of variance analysis and Duncan method. Two provenances, XBH and BDS, were chosen as the best provenances. The mean carbon content values of XBH and BDS were 74.38 kg

收稿日期: 2013-09-22

基金项目: 国家“十二五”科技支撑子课题(2011BAD37B02-1-2)

作者简介: 贾庆彬(1987—), 男, 在读博士。主要研究方向: 林木遗传改良。E-mail: 729217823@qq.com

* 通讯作者: 教授。主要研究方向: 林木遗传改良。E-mail: hanguozhang1@sina.com

and 69.27 kg respectively, and the mean value of these two provenances was higher than the overall mean value by 27.83%. The carbon content of XBH was higher than that of the CK and the provenance LSH (with the least carbon content) by 60.00% and 47.8%, and higher than the mean value of all the provenances by 28.3%.

Key words: *Larix olgensis*; growth trait; carbon content; correlation analysis; provenance selection

森林是陆地生态系统最大的碳库,在全球碳循环中起到重要作用^[1-2]。随着我国造林面积逐年加大,固碳树种的选育成为目前林木育种领域一项新的需求。目前国内外有关森林碳储量的研究已取得一定成果,有研究表明,林分生物量对于森林碳储量的贡献极显著^[3-5]。巨文珍等在长白落叶松林龄序列上的生物量及碳储量分配规律的研究中发现,除去较小的幼龄林分,其他林分的林木树干生物量都是地上生物量的主体(所占比例平均为56.12%),地上部分生物量对总生物量起到决定作用,碳储量的分配与生物量相同,地上部分为林分碳储量的主要部分^[6]。Didier Bert等研究发现,树木不同器官的含碳率存在差异^[7],而碳储量由生物量与含碳率共同决定,虽然不同林木器官的含碳率不同,但差异幅度并不是非常大,因此不同器官的碳贮量也主要由其生物量所决定^[3,8-9]。Poudel等在对瑞典中北部地区森林生物量与碳平衡的研究中发现,树干部分生物量达到林木总生物量的50%以上,且该比例随树龄的增长而增加^[10]。尤文忠等在对辽东山区落叶松人工林和蒙古栎天然次生林的固碳功能进行研究时发现,落叶松人工林树干部分生物量占林木总体生物量的68%以上,碳储量方面树干部分也起到决定作用^[11]。这与罗云建等对华北落叶松人工林生物量及其分配模式的研究^[12]、贾炜玮等在基于相容性生物量模型的樟子松林碳密度与碳储量的研究^[13]中所得结果相似。越来越多的研究表明树干部分是林木碳储量的主要部分,对总体碳储量起决定性作用。马钦彦等对华北地区主要森林类型的8个乔木建群种含碳率进行研究时发现,华北落叶松树干部分平均含碳率为49%左右,针叶树种各器官的含碳率普遍比阔叶树种高出1.6%~3.4%,相应的针叶林的碳储量也高于阔叶林^[14]。孙世群等在对安徽省乔木林固碳能力研究时发现,安徽省不同优势树种组年固碳能力不同,其中针叶林最大,达到 $6.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,针阔混交林年固碳能力最小,只有 $1.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[15]。

落叶松是我国主要的用材树种,在林业生产中占有重要地位^[16-17]。据第七次全国森林资源清查

结果显示,落叶松在我国乔木林面积比重中排名第五,总面积达1 063万公顷,其中落叶松人工林为286万公顷,占全国人工林总面积的7.14%^[18]。本文以31年生白落叶松(*Larix olgensis* Henry)种源试验林为研究对象,通过对林木碳储量研究过程中非破坏性取样方法的探究,利用试验证明1.3 m处木芯样品含碳率与树干平均含碳率之间的线性关系,对今后开展林木碳储量研究时减少试验林破坏,简化试验过程具有积极意义。同时,本试验通过测定植株碳含量,并结合生长、材性等多方面性状进行综合分析,最终选择出具备高固碳能力的长白落叶松种源,为今后长白落叶松种质资源保护、杂交育种、营造高固碳人工林等提供依据,具有一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验地区自然条件

尚志市地处 $44^{\circ}28' \sim 45^{\circ}35' \text{N}$, $127^{\circ}17' \sim 129^{\circ}12' \text{E}$ 之间。位于黑龙江省东南部、张广才岭西麓,属中温带大陆性季风气候。全年实日照2 446.9 h,无霜期120 d左右。1月最冷,平均气温 -19.7°C ;7月最热,平均气温 22°C 。年平均蒸发量1 172.1 mm,年平均降水量660.9 mm。主要风向春季多为西南风,冬季多为西北风。山地多为暗棕壤,主要分布在东、西部中、低山区。

1.2 试验林概况

种源试验林设于黑龙江省尚志市东北林业大学帽儿山实验林场,跃进2林班。采用完全随机区组设计,重复5次,10个种源,设对照1个,小区株数60株,双行排列。1982年定植,株行距: $1.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$,造林面积 1.2 hm^2 。1995年进行隔行去行间伐,2001年进行隔1株去2株间伐,目前试验林5次重复保存完整,每重复每种源10株,株行距为 $4.5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。

1.3 取样方法

取样主要包括两部分:首先,在试验林II、IV、V次重复内以各种源平均胸径为标准,每种源取2株,先在1.3 m处同一方向用直径5 mm的生长锥取得

由树皮至髓心的完整无疵木芯,之后伐倒,由1 m处起至梢头,每2 m截取圆盘一个,0 m处圆盘单独截取。之后,对试验林I、II、IV、V次重复进行木材取样,在1.3 m处同一方向用直径5 mm的生长锥取得由树皮至髓心的完整无疵木芯。每次重复每个种源随机选取8株树作为样本,共计取样352个。

1.4 指标测定与分析方法

木材密度采用饱和含水率法进行测定,综纤维素与木质素含量测定分别参照中华人民共和国国家标准GB/T 2667.10—95和GB/T 2667.8—94进行。

含碳率利用德国耶拿分析仪器股份公司,碳元素分析仪multi EA 4000进行分析。温度设定1 000℃,进样量50 mg。

干材生物量及碳储量计算方法:

$$V = (h + 3)g_{1.3}f_{\text{形}}^{[19]},$$

$$B = V \times \rho,$$

$$C = B \times C_c^{[20]}$$

式中:V—材积,立木材积按平均试验形数法计算; $f_{\text{形}}$ —形数,长白落叶松平均试验形数为0.41; h —树高; $g_{1.3}$ —胸高处横断面积; ρ —木材密度; C —碳储量; B —生物量; C_c —含碳率。

数据分析采用PASW Statistics18统计软件进行处理,主要包括独立样本T检验,回归分析,K-S检

验,相关分析,方差分析,多重比较等。

2 非破坏性取样方法可行性探究

2.1 树干部分平均含碳率与1.3 m处木芯样品含碳率差异性比较

将树干不同部位所取圆盘样品烘干、粉碎,粉碎后样品置于85℃烘箱中烘干至恒质量,之后分别进行含碳率测定。结果显示:树干不同部位含碳率存在差异,但总体上差异不大,其平均值在45%~47%之间变化(图1)。

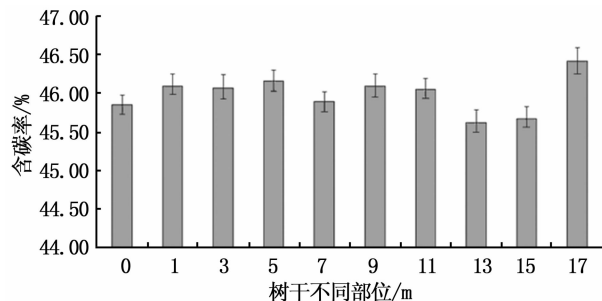


图1 树干不同部位含碳率均值变化情况

利用以上含碳率测定结果,计算出各种源树干平均含碳率,1.3 m处木芯样品单独进行含碳率测定。二者对比结果见表1。

表1 树干平均含碳率与木芯样品含碳率测定值

种源	II重复		IV重复		V重复	
	树干平均/%	木芯样品/%	树干平均/%	木芯样品/%	树干平均/%	木芯样品/%
白刀山-1	43.52	43.41	48.29	48.96	43.90	44.78
白刀山-2	46.92	46.75	44.31	45.89	47.39	46.92
白河-1	47.05	47.23	45.06	44.23	46.41	46.35
白河-2	43.30	43.68	46.77	46.17	46.70	46.08
大海林-1	48.07	48.27	47.05	47.52	48.08	48.62
大海林-2	46.23	47.03	46.03	45.57	43.23	43.91
大石头-1	45.44	45.69	44.40	43.97	46.93	46.49
大石头-2	45.48	44.88	45.25	45.45	48.26	48.66
对照 CK-1	48.15	48.94	46.66	47.32	47.10	47.46
对照 CK-2	49.17	48.15	49.59	49.08	46.70	46.77
和龙-1	44.43	45.75	49.41	49.05	46.43	47.15
和龙-2	44.99	44.31	49.15	48.94	47.39	47.26
鸡西-1	47.82	47.66	46.56	47.30	47.14	46.57
鸡西-2	47.44	47.76	45.94	46.03	46.89	46.51
露水河-1	45.47	45.82	46.29	46.81	48.67	49.93
露水河-2	46.13	46.58	46.49	47.39	48.77	49.27
穆棱-1	46.49	45.59	46.58	47.06	46.51	47.14
穆棱-2	46.54	46.17	49.15	48.83	46.91	46.54
天桥岭-1	48.44	47.91	46.21	45.83	43.92	42.92
天桥岭-2	42.47	43.58	50.92	48.79	45.82	45.95
小北湖-1	49.12	50.76	47.45	48.14	48.04	47.97
小北湖-2	46.45	45.92	48.01	48.18	45.79	46.19

以上对比结果显示:树干平均含碳率与 1.3 m 处木芯样品含碳率存在一定差异,但是并不明显。

为确定差异是否达到统计学中的显著水平,对以上数据进行独立样本 T 检验,结果见表 2。

表 2 1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率的独立样本 T 检验

类别	方差方程的 Levene 检验			均值方程的 t 检验						
	假设	F 值	显著度	t 值	自由度	显著度(双侧)	均值差值	标准误差值	差分的 95% 置信区间	
									下限	上限
木芯样品	假设方差相等	0.057	0.812	-0.316	130	0.753	-0.092 7	0.293 5	-0.673 4	0.487 9

由 1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率所做的检验结果可见,二者含碳率之间差异未达到显著水平,且双侧显著度为 0.753,远大于 0.05(差异达显著水平时显著度),由此可知,1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率并不存在显著差异,这为利用 1.3 m 处木芯样品推算林木树干平均含碳率的准确性提供条件。

2.2 利用 1.3m 处木芯样品含碳率推算树干平均含碳率

利用 Pearson 法对 1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率数据进行相关分析,结果显示:1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率存在极显著正相关关系,相关系数为 0.918,这反映出树干平均含碳率与 1.3 m 处木芯样品含碳率二者之间存在很强的线性关系。

经过以上的差异性比较和相关分析,对木芯样品含碳率和树干平均含碳率之间关系有了一定的了解,为进一步确定 1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率之间的关系,利用 PASW Statistics 18 软件对二者含碳率数据进行回归分析,结果显示(图 2):1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率存在线性关系,散点分布趋势明显。1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率之间直线方程为 $y =$

$0.908 2x + 4.379 4, R^2 = 0.842 5$ 。方程的拟合度达到理想水平,说明利用 1.3 m 处木芯样品含碳率推算树干平均含碳率可行。

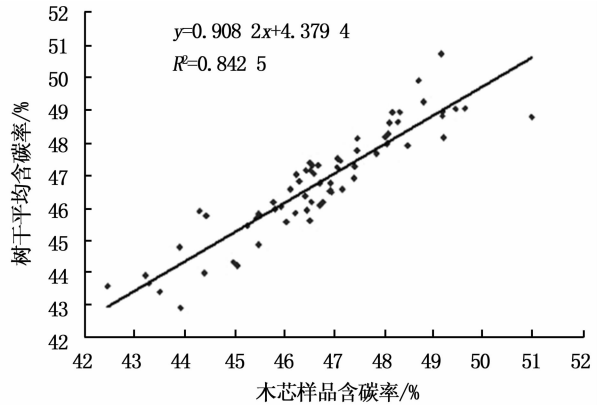


图 2 树干平均含碳率与木芯样品含碳率回归分析

3 长白落叶松种源各性状相关关系分析

林木某一性状的优良表现有时是多个性状相互作用的结果,通过相关分析了解各性状间的关系,探寻性状间的内部联系、通过对某一方面的改良使其它性状得到促进或抑制。本试验采用 Pearson 法对长白落叶松种源不同性状的测定值进行相关分析(表 3),结果显示:含碳率除仅与木质素含量呈显著

表 3 长白落叶松种源各性状间相关性分析

性状	树高	胸径	材积	密度	综纤维素含量	木质素含量	含碳率	干材生物量	碳储量
树高	1	0.487 **	0.682 **	-0.015	0.067	-0.101	-0.008	0.668 **	0.669 **
胸径		1	0.942 **	-0.024	0.146 **	-0.160 **	-0.051	0.929 **	0.922 **
材积			1	-0.049	0.147 **	-0.173 **	-0.021	0.982 **	0.978 **
密度				1	-0.634 **	0.356 **	0.056	0.123 *	0.126 *
综纤维素含量					1	-0.480 **	-0.051	0.033	0.026
木质素含量						1	0.161 **	-0.109 *	-0.094
含碳率							1	-0.011	0.066
干材生物量								1	0.997 **
碳储量									1

* 在 0.05 水平上显著相关; ** 在 0.01 水平上显著相关。

正相关外,与其它测量性状相关均未达到显著水平,其中,含碳率与生长性状、综纤维素含量表现为微弱负相关关系。碳储量方面,综纤维素含量、木质素含量、含碳率与碳储量相关不显著,木材密度与碳储量为显著正相关,生长性状、干材生物量与碳储量为极显著正相关。这说明林木生长性状、木材密度、生物量的优良表现对林木碳储量的增加具有积极的促进作用。

4 长白落叶松种源碳含量变异分析与高固碳种源选择

4.1 长白落叶松种源各性状描述性统计

对长白落叶松种源各性状测定值进行统计,从总体上对各性状平均值变化情况做初步了解,结果见表4。

表4 长白落叶松种源全部性状描述性统计

性状	均值	标准差	变异系数/%
树高/m	13.735	1.992	14.60
胸径/cm	23.116	1.676	7.22
材积/m ³	0.293	0.066	22.38
木材密度/(g·cm ⁻³)	0.396	0.017	4.21
纤维素含量/(g·g ⁻¹)	0.586	0.010	1.67
木质素含量/(g·g ⁻¹)	0.259	0.023	9.04
含碳率/(g·g ⁻¹)	0.512	0.011	2.21
干材生物量/kg	115.543	24.660	21.33
碳储量/kg	59.148	12.572	21.30

初步分析结果显示,生长性状中树高与材积变异系数较高,分别为14.60%和22.38%。材性性状与含碳率变异系数较小,均未超过10%。干材生物量与碳储量遗传变异较丰富,变异系数分别为21.33%和21.30%。

4.2 长白落叶松种源含碳率、干材生物量、碳储量变异分析

对长白落叶松种源含碳率、干材生物量与碳储量进行变异分析(表5),结果显示:含碳率变异较小,变异系数平均值为2.20%,生物量与碳储量存在较丰富的变异,二者变异系数均值分别为21.32%和20.94%。干材生物量变异系数较大的3个种源分别是:白刀山、穆棱、天桥岭,变异系数分别为26.23%、25.20%、22.74%,三者平均值高出总平均值15.93%,变异系数最大的白刀山种源比变异系数最小的鸡西桦木种源高出123.04%,比总平均值高23.00%。碳储量变异系数较大的3个种源分别是:白刀山、小北湖、白河,变异系数分别为

29.71%、23.04%、22.49%,三者平均值高出总平均值19.79%,变异系数最大的白刀山种源比变异系数最小的鸡西桦木种源高出114.51%,比总平均值高41.90%。

表5 长白落叶松种源含碳率、干材生物量、碳储量均值与变异系数

性状	种源	均值	标准差	变异系数/%
含碳率/(g·g ⁻¹)	白刀山	0.468	0.013	2.31
	白河	0.465	0.013	2.45
	大海林	0.467	0.013	2.53
	大石头	0.473	0.018	1.91
	对照CK	0.468	0.014	2.80
	和龙	0.464	0.009	1.24
	鸡西桦木	0.472	0.024	3.04
	露水河	0.467	0.022	2.56
	穆棱	0.466	0.015	2.82
	天桥岭	0.457	0.012	1.35
小北湖	0.474	0.011	1.20	
干材生物量/kg	白刀山	147.598	75.047	26.23
	白河	114.570	53.098	20.69
	大海林	131.985	64.135	21.97
	大石头	119.775	57.026	18.47
	对照CK	99.741	54.167	25.06
	和龙	113.734	44.073	22.64
	鸡西桦木	132.607	49.742	11.76
	露水河	107.501	52.274	17.27
	穆棱	113.455	51.586	25.20
	天桥岭	126.674	49.348	22.74
小北湖	157.028	63.884	22.55	
碳储量/kg	白刀山	69.266	35.534	29.71
	白河	53.173	24.463	22.49
	大海林	61.538	29.646	19.08
	大石头	56.862	27.718	21.52
	对照CK	46.502	25.157	21.92
	和龙	52.778	20.665	20.92
	鸡西桦木	62.282	22.818	13.85
	露水河	50.309	24.990	18.78
	穆棱	52.748	23.883	20.93
	天桥岭	57.973	23.138	18.07
小北湖	74.380	30.381	23.04	

4.3 长白落叶松各性状种源间差异性分析与优良种源筛选

4.3.1 长白落叶松种源各性状测定值K-S检验

样本数据是否符合正态分布是进行方差分析的前提条件,因此,在对种源间差异性进行方差分析前,先对各性状测定值进行K-S正态分布检验,见表6。结果显示:各性状测量值K-S检验显著度全部大于0.05,证明数据分布均呈正态分布。

表6 长白落叶松种源各性状测定值 K-S 检验

检验项目	树高	胸径	材积	密度	纤维素含量	木质素含量	含碳率	干材生物量	碳储量	
正态参数	均值	13.735	23.115	0.293	0.396	60.331	27.736	0.467	115.543	54.024
	标准差	2.053	1.959	0.076	0.016	1.426	2.262	0.010	29.087	13.813
最极端差别	绝对值	0.110	0.104	0.127	0.084	0.081	0.077	0.164	0.148	0.131
	正	0.110	0.104	0.127	0.084	0.059	0.077	0.098	0.148	0.131
	负	-0.072	-0.063	-0.092	-0.061	-0.081	-0.063	-0.164	-0.083	-0.096
Kolmogorov-Smirnov Z	0.728	0.691	0.843	0.556	0.535	0.510	1.085	0.981	0.869	
渐近显著性(双侧)	0.664	0.726	0.477	0.917	0.937	0.957	0.194	0.291	0.437	

4.3.2 长白落叶松种源各性状方差分析

对长白落叶松各性状测定值进行方差分析(表7),结果显示:种源间材积、干材生物量、碳储量存在显著差异,材性性状与含碳率差异不显著。对3个差异显著性状分别利用 Duncan 法进行多重比较,发现小北湖、白刀山两个种源与其它种源间存在显著差异。二者材积分别为 0.4008 m^3 和 0.3458 m^3 , 其平均值比总平均值(0.2929 m^3)高出 27.45%, 材积最大的小北湖种源比最小的露水河(0.2570 m^3)高 55.95%, 比对照 CK(0.2148 m^3)高 86.59%, 比总平均值高 36.84%。干材生物量方面,小北湖与白刀山种源分别为 157.03 kg 和 147.60 kg, 二者平均值比总平均值(124.06 kg)高出 22.78%, 其中生长最快的小北湖比生长最差的露水河(107.50 kg)高 46.07%, 比对照 CK(99.74 kg)高出 57.44%, 比总平均值高出 26.58%。碳储量方面,小北湖与白刀山种源分别为 74.38 kg 和 69.27 kg, 二者平均值比总平均值(57.98 kg)高出 23.87%, 比对照 CK(46.50 kg)高出 54.45%。以现有试验林为标准,若

表7 长白落叶松种源各指标方差分析

性状	类别	平方和	自由度	均方	F	显著度
树高	种源	46.674	10	4.667	1.145	0.361
	误差	134.502	33	4.076		
胸径	种源	61.725	10	6.173	1.971	0.070
	误差	103.37	33	3.132		
材积	种源	0.096	10	0.01	2.069	0.050
	误差	0.153	33	0.005		
密度	种源	0.001	10	0.0001	0.327	0.968
	误差	0.01	33	0.0003		
纤维素含量	种源	19.211	10	1.921	0.929	0.520
	误差	68.235	33	2.068		
木质素含量	种源	52.36	10	5.236	1.03	0.441
	误差	167.712	33	5.082		
含碳率	种源	9.282	10	0.928	0.804	0.626
	误差	38.089	33	1.154		
干材生物量	种源	14928.879	10	1492.888	2.297	0.036
	误差	21450.686	33	650.021		
碳储量	种源	3455.155	10	345.516	2.401	0.029
	误差	4748.679	33	143.899		

选择小北湖种源,则每公顷固碳 27 297.46 kg(每公顷固碳量由种源单株碳储量均值(详见表5)与试验林单位面积株数相乘求得,目前试验林每公顷 367 株),比目前试验林每公顷固碳量(21278.66 kg)高 28.28%, 比利用碳储量最小的露水河种源(18463.77 kg)造林每公顷固碳量高 47.85%。若选择白刀山种源,则每公顷固碳 25 422.09 kg, 比目前试验林每公顷固碳量高 19.46%, 比利用碳储量最小的露水河种源造林每公顷固碳量高 37.68%。

5 结论与讨论

非破坏性取样的方法,首先对样本树干不同部位的含碳率进行了测定。测定结果显示:树干不同部位含碳率存在差异,但总体上差异不大。值得注意的是,本试验测得树干 17 m 处含碳率相对较高,分析原因可能主要包括以下两个方面:首先,试验所选样地为 31 年生长白落叶松种源试验林,已达到成熟林标准,林龄相对较大,其生长趋于缓慢,林木上部由于生长活动的减弱,水分、养分供应的减少,可能已经出现老化或木质化现象,这很可能是含碳率相对较高的原因之一。其次,试验林中所取林木样本的树高并没有全部达到 17 m,这使得 17 m 处样本量比照其它部位样本量相对减少,因此,其均值受到单个样品数据的影响也相应加大,这也很可能是图 1 中 17 m 处含碳率高的原因。利用 1.3 m 处木芯样品含碳率推算树干平均含碳率,进行回归分析后发现,1.3 m 处木芯样品含碳率与树干平均含碳率之间存在线性关系,且趋势明显。这与李艳霞等在长白落叶松纸浆材优良家系多性状联合选择的研究中,利用 1.3 m 处木芯样品与解析木进行的回归分析所得结论相近,二者在基本密度、管胞形态等材性性状方面均存在较强的线性关系^[21]。最终,本文拟合出利用 1.3 m 处木芯样品含碳率推算树干平均含碳率的直线方程, $y = 0.9082x + 4.3794$, 其 R^2 值为 0.8425。方程拟合程度达到理想水平,这表明利用

1.3 m 处木芯样品含碳率数值可有效推算树干平均含碳率,对今后林木碳储量研究过程中减少试验林破坏,简化试验程序,保证试验结果相对准确具有一定的参考价值。

各性状间相关分析结果显示,长白落叶松 10 个种源各性状中碳储量与生长性状、干材生物量存在极显著正相关关系,含碳率与木材密度、木质素含量、碳储量均为正相关,其中含碳率与木质素含量呈极显著正相关。此结果表明,生长性状与生物量的优秀表现对林木碳储量的增强具有积极的促进作用,这为今后通过对林木生长性状进行改良进而提高森林碳储量提供了可能,对营建高固碳人工林的生产实践具有一定的参考价值。木材中的碳主要以纤维素和木质素形式存在,本试验结果显示,含碳率与木质素呈显著正相关关系,这对今后通过分子育种途径对木质素含量进行遗传改良,进而提高林木含碳率具有一定的参考与指导作用。对于其它材性性状方面,本研究发现,木材密度与树高、胸径、材积间的相关系数分别为 -0.015 、 -0.024 和 -0.049 ,说明随着材积的增大,木材密度可能会有所下降。这与以往孙晓梅等在日本落叶松纸浆材优良家系多性状联合选择^[17],邓继峰在 17 年生杂种落叶松遗传变异及优良家系选择等研究中所得结果相近^[22]。尽管木材密度与材积呈现负相关关系,但相关不显著,且表现微弱,表明并不是所有生长较快的植株其木材密度均会下降,因此,通过合理选择,可以筛选出木材密度较高且生长性状优良的种源。这一现象的存在很可能是由于木材密度与生长性状二者独立遗传,受不同的遗传机制控制,值得今后进行更深入的研究。

长白落叶松性状变异分析与高固碳种源选择的研究结果显示,长白落叶松 10 个种源各性状中材性与含碳率变异相对较小,含碳率种源平均变异系数为 2.21%,其中,变异系数最大的鸡西桦木种源也仅为 3.04%。陈遐林在华北主要森林类型的碳汇功能研究一文中,对华北地区主要建群树种含碳率进行分析,发现含碳率种内变异系数华北落叶松为 2.85%、油松 2.68%、红皮云杉 2.48%,与本文所得结果类似,含碳率变异系数均相对较小^[23]。相比含碳率性状,长白落叶松种源干材生物量与碳储量存在较丰富的变异,其变异系数分别为 21.33% 和 21.30%,这为长白落叶松固碳能力的改良提供了可能。对各性状进行的方差分析结果显示,种源间含

碳率差异未达到显著水平,而碳储量存在明显差异。这充分说明林木碳储量由多因子组成,受到生长性状、木材密度、含碳率、生物量等性状的共同作用,含碳率、生物量等虽然是影响林木碳储量的重要因素,但并非决定因素,这也正是本文与以往育种研究中简单的生长选择最大的不同。综合以上分析结果,最终选择出小北湖与白刀山两个种源为高固碳能力种源。碳储量方面:小北湖与白刀山种源分别为 74.38 kg 和 69.27 kg,二者平均值比总平均值高出 23.87%,比对照 CK 高出 54.45%。以现有试验林为标准,若选择小北湖种源,则每公顷固碳 27 297.46 kg,比目前试验林每公顷固碳量高 28.28%,比利用碳储量最小的露水河种源造林每公顷固碳量高 47.85%。若选择白刀山种源,则每公顷固碳 25 422.09 kg,比目前试验林每公顷固碳量高 19.46%,比利用碳储量最小的露水河种源造林每公顷固碳量高 37.68%。

由本研究结果可见,通过合理选择,利用具有高固碳能力的种源造林,森林单位面积的碳储量将得到明显提高,对增加森林碳汇,发展绿色经济具有重要意义。

参考文献:

- [1] Michiel B., Johannes R., Dylan C., et al. Estimating Carbon Stock in Secondary Forests: Decisions and Uncertainties Associated with Allometric Biomass Models [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(8): 1648 - 1657
- [2] Paul K I, Reeson A, Polglase P J, et al. Economic and employment implications of a carbon market for industrial plantation forestry [J]. *Land Use Policy*, 2013, 30(1): 528 - 540
- [3] Grant M. Domke, Christopher W. W., Jamem E. S., et al. Consequences of alternative tree-level biomass estimation procedures on U. S. forest carbon stock estimates [J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 270: 108 - 116
- [4] Juan Carlos Loaiza Usuga, Jorge Andrés Rodríguez Torb, Mailing vanessa Ramirez Alzate, et al. Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(10): 1906 - 1913
- [5] Douglass F Jx, Marcus F S, Larry R S. Aboveground carbon biomass of plantation - grown American chestnut (*Castanea dentata*) in absence of blight [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(3): 288 - 294
- [6] 巨文珍,王新杰,孙玉军. 长白落叶松林龄序列上的生物量及碳储量分配规律[J]. *生态学报*, 2011, 31(4): 1139 - 1148
- [7] Didier Bert, Frédéric Danjon. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.) [J]. *Forest*

- Ecology and Management, 2006, 222(1-3): 279-295
- [8] 杜红梅, 王超, 高红真. 华北落叶松人工林碳汇功能的研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 756-759
- [9] Heljä-Sisko Helmisaari., Krisi M, Seppo K, *et al.* Below and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland[J]. Forest Ecology and Management. 2002, 165(1-3): 317-326
- [10] Bishnu C P, Roger S, Johan B, *et al.* Potential effects of intensive forestry on biomass production and total carbon balance in north-central Sweden[J]. Environmental Science & Policy, 2012, 15(1): 106-124
- [11] 尤文忠, 魏文俊, 邢兆锐, 等. 辽东山区落叶松人工林和蒙古栎天然次生林的固碳功能[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 21-24
- [12] 罗云建, 张小全, 王效科, 等. 华北落叶松人工林生物量及其分配模式[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 13-18
- [13] 贾炜玮, 李凤日, 董利虎, 等. 基于相容性生物量模型的樟子松林碳密度与碳储量研究[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(1): 6-13
- [14] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, 28(5/6): 96-100
- [15] 孙世群, 王书航, 陈月庆, 等. 安徽省乔木林固碳能力研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(7): 144-147
- [16] 马常耕. 从世界落叶松遗传改良现状论我国落叶松良种化的对策[J]. 世界林业研究, 1992, (1): 57-65
- [17] 孙晓梅, 张守攻, 李时元, 等. 日本落叶松纸浆材优良家系多性状联合选择[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 48-54
- [18] 国家林业局森林资源管理司. 第七次全国森林资源清查及森林资源状况[J]. 林业资源管理, 2010, 1: 1-8
- [19] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 37-38
- [20] 张超, 张含国, 朱航勇, 等. 日本落叶松碳储量家系遗传变异及优良家系选择研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(10): 53-62
- [21] 李艳霞, 张含国, 张磊, 等. 长白落叶松纸浆材优良家系多性状联合选择研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(6): 721-718
- [22] 邓继峰, 张含国, 张磊, 等. 17年生杂种落叶松遗传变异及优良家系选择[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(1): 8-11
- [23] 陈遐林. 华北主要森林类型碳汇功能的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003