

基于航空点云的落叶松林分蓄积量建模和应用测试初探

高金萍, 孙忠秋, 于慧娜, 高显连, 吴发云, 刘迎春

(国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: 以东北虎豹国家公园内“星机地”综合试验获取的激光雷达点云和地面样地调查成果为基础数据, 以落叶松为重点案例, 探索了激光雷达调查方式下落叶松林分蓄积量建模方法, 并结合东北内蒙古重点国有林区二类调查成果, 运用模型初步估算了该地区部分落叶松二类小班的公顷蓄积, 实现了激光雷达科研模型成果在业务化应用方向上的一次有效尝试。从模型结果和小范围应用测试结果来看, 落叶松林分蓄积量模型预估精度达到《森林资源规划设计调查技术规程》的要求, 可以在实践中推广应用, 但要想真正规模化业务生产和应用, 还需要在模型精度、普适性和规模化应用效率上深耕细耘。

关键词: 激光雷达调查; 东北林区; 落叶松小班; 林分蓄积量; 航空表; 应用测试

中图分类号: S757.2; S771.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6622(2021)04-0054-08

DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2021.04.008

Modeling and Application Test of Larch Stand Volume Based on Aerial Lidar Point Cloud

GAO Jinping, SUN Zhongqiu, YU Huina, GAO Xianlian, WU Fayun, LIU Yingchun

(Academy of Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: Based on the LIDAR point cloud and ground sample survey results obtained from the satellite-air-ground comprehensive test in the Northeast China Tiger and Leopard National Park, with emphasis on the larch (*Larix spp.*) case, this paper explored the laser radar survey mode method of larch forest volume model theory, and combined with the type 2 investigation results of key state-owned forest region of Inner Mongolia in northeast China. The results of the model were used to preliminarily calculate the hectare stock of some type 2 subcompartments of larch in this area, which was an effective attempt to apply the results of the Lidar research model in the direction of business application. From the model results and application test results in a small scale, larch forest stand volume precision of the model could meet the requirements of the forest resource planning and survey technology regulation, thus it can be applied in practice. To achieve truly scale business production and application, we need to make deep efforts in model precision, universality and scale application efficiency.

Key words: LIDAR survey, northeast forest region, subcompartment of larch, stand stock, aeronautical volume table, application test

基金项目: 国家林业和草原局“行业管理专项业务经费—陆地生态系统碳监测卫星项目”(180015); 国家林业和草原局“森林资源监测与评价—重点国有林区调查成果汇总”(2130207);

北京空间机电研究所“陆地碳卫星多波束激光雷达载荷数据的林业应用能力研究”(2020年开放基金项目) 作者简介: 高金萍(1976—), 女, 湖北鄂州人, 教授级高工, 主要从事林业信息管理和应用工作。

Email: gaojinping_cz@sina.com

通讯作者: 高显连(1964—), 男, 辽宁大连人, 教授级高工, 主要从事森林资源监测, 林业信息和遥感应用工作。

Email: 248745622@qq.com

1 研究背景

森林蓄积量是森林资源监测的核心调查内容之一，它反映了一个国家或地区森林资源总规模或水平，也是衡量森林生态状况的重要指标之一。我国从“十二五”开始，将其作为约束性指标纳入国民经济与社会发展规划。从20世纪70年代开始，我国建立的全国森林资源清查体系和各省（地区）森林资源规划设计调查制度，均是以野外地面调查为主体，通过专业的地面调查队伍，获取权威、可靠的胸径、树高等重要指标，再结合本地树种蓄积模型，推算得到森林蓄积量指标。由于我国森林分布范围广、面积大、大多地处偏僻遥远的林区或山区，传统的地面调查需要获取每株样木胸径和树高，调查任务繁重、条件艰苦、工作强度极大，需要耗费大量的人力、物力和财力^[1]。当前，森林资源监测工作面临调查人员匮乏、调查队伍结构老化、调查成本日趋高涨的困境，迫切需要创新突破和升级换代监测技术和装备设施，以适应新时期森林资源监测工作的新形势和新要求^[2]。

对地观测与定位技术的兴起，为森林资源动态监测提供了先进感知手段。近些年来，光学遥感技术的发展解决了传统地面调查存在的时间和人力耗费过高的不足，基于光学遥感影像中提取的植被指数、纹理特征等信息，通过构建地面样地实测蓄积与遥感变量之间的回归模型，可实现对森林蓄积量的定量估计^[3-4]。但由于光学遥感难以获取森林三维结构信息，且在森林郁闭度高的区域会存在光谱信号饱和等问题^[5]，在实际工作中还是难以满足森林资源调查精度的要求。

激光雷达技术可以直接、精确地获取植被的三维结构信息，有效弥补光学遥感林业应用能力的不足^[6]。国外自20世纪80年代开始开展森林参数估测研究^[7]，Keiko等^[8]利用激光雷达点云估测日本西部阔叶林的样地蓄积量，Vincenzo^[9]估测了意大利米兰都市区周边阔叶森林的蓄积量及地上生物量。国内近10年来，利用激光雷达点云高度、密度等信息构建森林结构、估测森林蓄积的研究逐步扩大化。2014年，曹林^[10]借助机载激光雷达点云，估测了江苏常熟虞山林场北亚热带天然次生林森林参数；2018年，刘浩等^[11]借助机载激光雷达点云，预测了中国东南沿海平原人工林分特征；2020年，曾伟生等^[12]基于东北林区红松林样地的机载激光雷达数据和地面实测数据，建立了红松林分蓄积量模型，预估精度达到森林资源调查相关技术要求，并开展了航空蓄积表理论研究。随着近年来激光雷达数据获取成本日趋降低，激光雷达技术由科学研究转为业务探索时机已趋成熟，但尽管建模理论研究成果较多，大多都局限于模型和精度理论探讨，结合实际生产实践业务数据对模型进行应用测试和分析评价的较少。

2017年，原国家林业局调查规划设计院（以下简称国家林草局规划院）启动了“星机地”综合试验计划，拟在我国东北、华北、西北、南方、西南、西藏6个区域（12个省左右）开展有人机、无人机和地面调查相结合的“星机地”综合试验，以获取全国典型森林类型（包括占全国85%蓄积量的主要树种）的激光雷达及地面样地数据等信息（约4500个样地）。该计划的一个重要目标就是开展激光点云林分蓄积量建模和业务化应用研究，最终形成覆盖全国主要森林分区和主要树种的、面向林业生产实践的航空蓄积表模型体系。2017—2020年，先后在湖南张家界周边、东北虎豹国家公园（以下简称东北虎豹公园）、福建武夷山国家公园和海南热带雨林国家公园开展了空地一体化调查。本文将以东虎豹公园中落叶松为例，探索基于航空点云的林分蓄积量建模和业务化应用测试方案，为其他树种林分蓄积量建模和小班蓄积量估测提供技术路线和方法，为逐步构建我国面向生产的分林

区、分树种的航空 蓄积表模型体系提供数据和模型支撑。

2 研究区与数据概况

2.1 研究区简介

东北虎豹公园地跨黑龙江和吉林两省，其中吉林省片区占 70% 面积以上，东起吉林省珲春林业局青龙台林场，西至吉林省汪清县林业局南沟林场，南自吉林省珲春林业局敬信林场，北到黑龙江省东京城林业局奋斗林场，总面积近 1.5 万 km²。公园处于亚洲温带针阔叶混交林生态系统的中心地带，区域内有众多的温带森林植被类型，是北半球温带区生物多样性最丰富的地区之一。2018 年 9—10 月，国家林草局规划院在东北虎豹公园开展了有人机、无人机飞行作业及地面样地调查工作，获取了研究区大量有人机和无人机激光点云数据及对应的地面样地、样木调查数据，为基于航空点云林分蓄积模型和小班林分蓄积量估测研究提供了珍贵的空地一体化调查基础数据。

2.2 研究区数据分析

根据东北内蒙古重点国有林区二类调查主要树种统计结果，东北虎豹公园空地调查主要树种为落叶松(*Larix spp.*)、云杉(*Picea spp.*)、冷杉(*Abies spp.*)、桦木树(*Betula spp.*)、杨树(*Populus spp.*)、椴树树(*Tilia spp.*)、栎类(*Quercus spp.*) 7 种纯林树种和针叶混、针阔混、阔叶混 3 类混交林分类型。其中落叶松是研究区内分布最为广泛的树种之一，且根据第 9 次全国森林资源清查结果，在针叶林中，落叶松分布面积居第一位，蓄积量居第四位，是我国重要的针叶树种^[12]。

2.2.1 有无人机激光雷达调查数据

激光雷达调查数据以有人机激光雷达点云为主，对有人机未覆盖的区域采用无人机补飞。有人机飞行区域主要分布在大兴沟、天桥岭、穆棱、东京城等 4 个林业局及部分林场(总面积约 5 600km²)；无人机飞行区域包含 17 个 1 km² 的航空调查大样地，主要分布在大兴沟、天桥岭、汪清、珲春等 4 个林业局。激光雷达传感器主要参数及调查数据分布范围分别如表 1 和图 1 所示。

表 1 激光雷达传感器参数

Tab. 1 Lidar sensor parameters

主要指标	有人机	无人机
传感器类型	RIEGL-VQ-1560i	RIEGL VUX-1UAV
地理坐标系	CGCS2000 国家大地坐标系	CGCS2000 国家大地坐标系
高程基准	1985 国家高程基准	1985 国家高程基准
投影方式	高斯克吕格投影, 3° 分带, 东偏 500km, 加带号	高斯克吕格投影, 3° 分带, 东偏 500km, 加带号
点密度	平均约 10 点/m ²	约 40 点/m ²



图1 激光雷达点云数据覆盖范围

Fig. 1 The coverage of Lidar point cloud data

2.2.2 地面调查样地数据

在东北虎豹公园的航空(包括有人机和无人机)飞行覆盖区域内,对需要建模的7个纯林树种和3个混交林布设地面调查样地。考虑到不同树高、郁闭度等级对林分蓄积量的影响,将每个树种划分5个树高级(高、较高、中等、较低、低)及3个郁闭度等级(0.2~0.5, 0.5~0.8, 0.8以上),样地布设时尽可能保证建模样本涵盖所有树高级和郁闭度等级,以提高模型的适用性。本研究共布设并调查完成488个圆形样地(半径15m),其中落叶松样地57个,其主要调查因子如表2所示。表3展示了部分落叶松样地的关键调查因子数据。

2.2.3 落叶松小班二类本底调查成果

2016—2018年,东北内蒙古重点国有林区完成了二类调查,东北虎豹公园建立了覆盖全境的、时间节点统一至2018年底的二类调查本底。以大兴沟林业局为例,基于二类调查本底成果,提取大兴沟林业局内优势树种为落叶松的小班,全部落叶松小班分布图如图2所示。

3 研究方法和结果

根据落叶松地面样地边界,提取落叶松样地激光点云,建立地面样地实测蓄积与激光点云中提取的高度、密度、覆盖度等变量之间的回归关系,构建基于航空点云调查数据的落叶松林分蓄积量回归模型并分析其理论精度。

表2 地面调查样地数据表结构(部分因子)

Tab. 2 Data table structure of ground surveysample plots (partial factor)

编号	字段名	字段内容
1	YDH	样地编号
2	SHU_ZHONG	树种编号
3	SHU_GAO_J	树高级
4	YU_BI_DUJ	郁闭度级
5	PJ_XJ	样木平均胸径
6	PJ_SG	样木平均树高
7	SHU_G_MAX	样木最大树高
8	SHU_G_MIN	样木最小树高

表 3 样地主要调查因子示例(部分样地)

Tab.3 Examples of main survey factors of the sample plots (partial plots)

DH	Y	SHU_ZH	SHU_GA	YU_BI	PJ	PJ	SHU_G	SHU_G	XU
ONG	O_J	DUJ	_XJ	SG	MAX	MIN	_JI		
2224241500001 51609		150000	4	1	19.4	20.	24.5	5.5	9.4
2224241500001 41610		150000	4	1	20.4	16.9	21.4	3.5	9.0
2224241500001 11611		150000	1	1	8.2	6.3	11.4	3.6	0.8
2224241500001 22637		150000	1	2	8.1	7.7	10.3	1.8	2.4
2224241500001 11685		150000	1	1	7.0	6.9	9.1	5.1	1.5
2224241500001 11686		150000	1	1	10.0	8.2	11.2	6.3	2.7
2224241500001 42509		150000	4	2	20.6	21.	23.4	10.7	10.6
2224241500001 53510		150000	5	3	19.0	21.8	25.5	7.3	14.3
2224241500001 41511		150000	4	1	21.5	17.7	23.4	6.0	5.6
22242415000015 3512		150000	5	3	18.2	21.0	26.3	4.5	16.6
22242415000013 2517		150000	3	2	14.7	12.8	16.2	4.7	9.4
22242415000013 1518		150000	3	1	19.6	15.6	20.4	9.3	6.9
22242415000013 2519		150000	3	2	17.3	15.5	18.2	4.9	8.7
22242415000013 3520		150000	3	3	12.2	14.0	17.4	4.4	9.1
22242415000013 1521		150000	3	1	16.6	15.8	18.8	6.4	7.4
22242415000012 2527		150000	2	2	11.6	11.1	15.3	3.5	5.2
22242415000013 1703		150000	3	1	13.9	11.9	15.8	2.4	5.7
22242415000012 2704		150000	2	2	13.4	11.4	14.5	5.5	6.5
22242415000013 3707		150000	3	3	11.7	13.2	17.0	3.5	8.2
22242415000011 3708		150000	1	3	8.2	8.0	12.7	4.0	4.1

为推进理论模型业务化研究，尝试利用建立的模型成果对研究区落叶松小班单位面积蓄积量进行估算；通过与二类调查获取的蓄积量数据对比分析，评估基于航空点云的林分蓄积量模型相对精度，初步评估基于航空点云的林分蓄积量模型进入

业务应用的潜力和能力。本研究先在较小的范围（21个落叶松小班）开展模型应用测试，取得较为理想效果；然后将测试范围扩大到2018年开展过二类实地调查的大兴沟林业局（约260多个落叶松小班）。总体技术路线如图3所示。

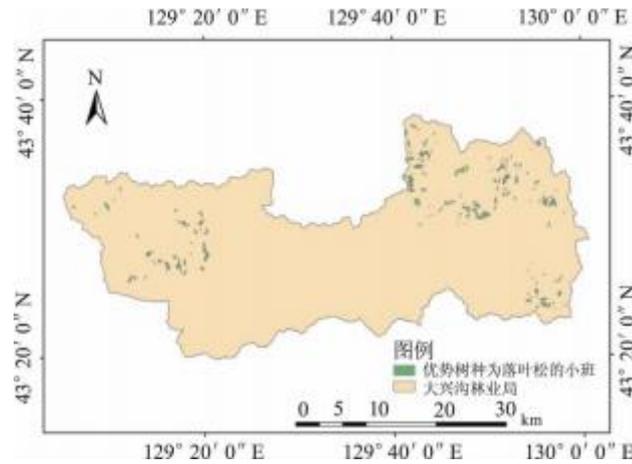


图2 大兴沟林业局落叶松小班空间分布图
Fig. 2 Distribution map of Larch subcompartment in Daxingou Forestry Bureau

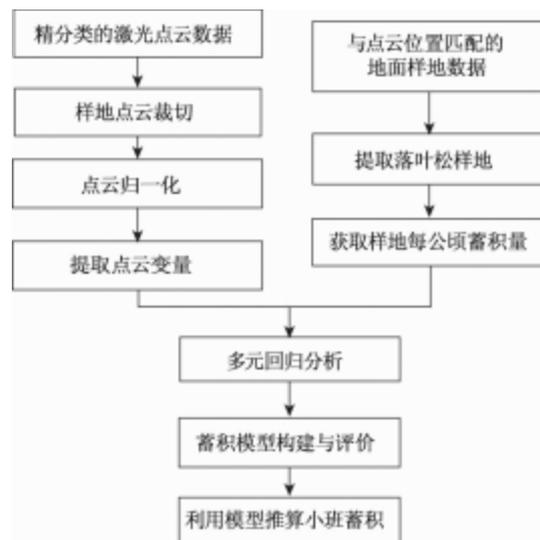


图 3 总体技术路线
Fig. 3 General technology roadmap

3.1 建模变量提取

基于精确分类后的激光雷达调查数据和落叶松地面样地范围，裁切出与地面样地位置和大 小一致的落叶松激光点云数据。利用点云中分类得到的地面点通过 TIN 插值生成地面高程模型 (DEM)，基于 DEM 的地面高程信息对点云进行归一化处理，得到归一化后的落叶松点云数据。从落叶松点云数据中提取建模所需变量，包括系统提供的 46 个高度变量、10 个密度变量、1 个覆盖度变量，共计 57 个统计变量，各类变量内涵及分析如表 4 所示。

表 4 激光点云数据初始变量分析
Tab. 4 Initial variable analysis of lidar point cloud data

变量类型	系统提供的变量个数	变量含义	提取分析
------	-----------	------	------

高度变量	46 个	包括高度百分位数、累计高度百分位数、点云平均高、中位数等统计变量	高度变量中包含了高度百分位数变量组和累积高度百分位数变量组，两组变量物理含义相似，考虑到前者更易于理解且物理学涵义较为清晰，因此只保留前者参与变量提取与筛选
密度变量	10 个	将点云数据从低到高分成 10 个相同高度的切片后，每层回波数的比例	全部参与变量提取与筛选
覆盖度变量	1 个	首次回波的植被点数占首次回波总点数的比例	全部参与变量提取与筛选
合计	57 个		保留 41 个

3.2 蓄积估测模型构建与评价

建立蓄积量与点云变量之间的关系，一般采用以下非线性回归模型：

$$V = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_n^{\beta_n} + \varepsilon \quad (1)$$

式中：V 为蓄积量； $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为待定回归系数； x_1, x_2, \dots, x_n 为建模变量； ε 为误差项。

由于上述非线性模型求解较为复杂，通常会采用对数回归的方法，也就是将所有变量进行对数变换，将多元非线性问题转化为多元线性回归来解决：

$$\ln V = \alpha_0 + \alpha_1 \ln x_1 + \alpha_2 \ln x_2 + \dots + \alpha_n \ln x_n + \delta \quad (2)$$

式中：V 为蓄积量； $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 为待定回归系数； x_1, x_2, \dots, x_n 为建模变量； δ 为误差项。

利用 40 个落叶松样地进行建模，余下 17 个样地用来验证模型估测精度。采用多元线性回归方法时，运用逐步回归法合适变量。由于提取的变量较多，一些与蓄积相关性不高的变量可以在逐步回归之前先舍去。因此，将提取的变量与需要预测的蓄积量进行 Pearson 相关分析，根据 Pearson 相关系数大小，初步剔除 Pearson 相关系数较低 (<0.3) 的变量。

利用逐步回归得到的回归系数构建林分蓄积量模型，采用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、相对均方根误差 (rRMSE)、平均绝对误差 (MAE)、平均绝对百分比误差 (MAPE)、总体相对误差 (TRE) 来衡量模型估测精度。

利用逐步回归筛选进入模型的变量，分别是 50% 高度百分位数 (h_{50th}) 和覆盖度 (CC)，建模结果为：

$$\ln V = 0.918 \ln h_{50th} + 1.303 \ln CC + 3.091 \quad (3)$$

利用建立的模型估测 17 个落叶松验证样地的单位面积蓄积，绘制基于模型的蓄积估测值和地面样地蓄积实测值的散点图(图 4)，得到的 R^2 为 0.84，RMSE 为 $23.77 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，rRMSE 为 0.18，MAE 为 $20.08 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，MAPE 为 16.21%，TRE 为 4.5%。从验证结果来看，基于激光点云的落叶松林分蓄积量模型具有较高的精度。按照《森林资源规划设计调查技术规程》^[14] 中小班调查蓄积量的精度等级标准，A, B, C 三级要求相对误差分别不超过 15%，20% 和 25%，基于激光点云的落叶松林分蓄积量模型接近 A 级、可以满足 B 级的精度要求。

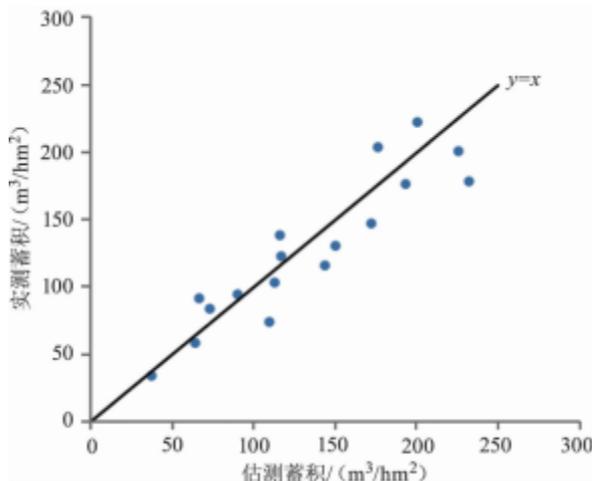


图4 验证样地蓄积估测与实测值散点图

Fig.4 Scatter plot of estimated and measured volume of the sample plots for validation

3.3 应用模型估算样地所在落叶松小班单位面积蓄积 基于东北虎豹公园二类小班调查本底成果，提

取落叶松地面样地所在的二类小班 21 个(小班平均面积约 15hm²)；叠加空地一体化调查获取的激光雷达点云数据后，获取这 21 个二类小班的航空点云数据；然后利用已建立的落叶松林分蓄积量模型估测小班单位面积蓄积量。经分析，小班蓄积估测值与小班实际调查值的散点图如图 5 所示，落叶松小班二类蓄积量与基于激光点云的模型估算得到的蓄积量比较情况如表 5 所示。

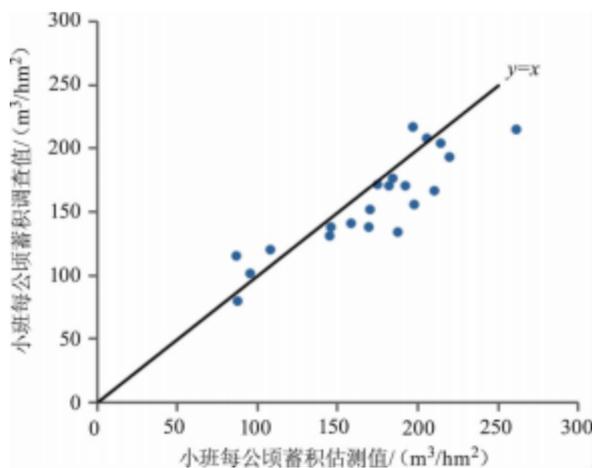


图5 21 个落叶松小班蓄积估测与二类本底调查蓄积散点图

Fig.5 Scatter plot of estimated and measured volume of 21 subcompartments of Larch and type 2

表5 落叶松小班估测蓄积与二类调查结果对比分析表

Tab.5 Table of comparative analysis of estimated and measured volume of the Larch subcompartment

小班编号	估测蓄积/ (m ³ / hm ²)	实测蓄积/ (m ³ / hm ²)	小班面积/ hm ²	绝对误差/ (m ³ / hm ²)	相对 误差/ %
0800012	181. 90	170. 52	22. 88	11. 38	6. 7
0800013	191. 93	170. 76	16. 34	21. 17	12. 4

0800019	210. 55	166. 92	1. 20	43. 63	26. 1
8100002	108. 05	120. 21	14. 89	12. 15	10. 1
8200001	144. 92	131. 17	12. 12	13. 75	10. 5
4500003	87. 51	80. 39	4. 29	7. 12	8. 9
5400018	184. 40	177. 19	17. 99	7. 21	4. 1
5400019	175. 21	172. 21	37. 75	3. 00	1. 7
5400024	187. 10	134. 00	33. 64	53. 11	39. 6
5400028	196. 63	217. 12	14. 44	20. 50	9. 4
5400031	197. 63	156. 29	26. 67	41. 34	26. 5
0100018	95. 04	102. 15	9. 12	7. 11	7. 0
0100025	86. 51	115. 09	4. 89	28. 58	24. 8
7800081	145. 88	138. 11	5. 68	7. 77	5. 6
8000014	158. 62	141. 29	12. 71	17. 33	12. 3

(续表)

小班编号	估测蓄积 (m ³ / hm ²)	实测蓄积 (m ³ / hm ²)	小班面积 (hm ²)	绝对误差 (m ³ / hm ²)	相对 误差/ %
3800047	213. 80	204. 74	7. 28	9. 06	4. 4
6400021	219. 98	193. 40	15. 53	26. 59	13. 7
2300002	169. 11	137. 83	5. 66	31. 28	22. 7
1100031	170. 15	151. 64	10. 18	18. 51	12. 2
2200007	205. 88	208. 83	17. 41	2. 95	1. 4
1500010	261. 59	215. 36	24. 30	46. 22	21. 5
整体精度	$R^2 = 0.78$ $RMSE = 25.22 \text{ m}^3 / \text{hm}^2$ $rRMSE = 0.16$ $MAE = 20.46 \text{ m}^3 / \text{hm}^2$ $MAPE = 13.4\%$		估测小班总蓄积: 57364.58 hm^2 二类调查小班总蓄积: 51877.00 hm^2 小班蓄积总量估测 相对精度: 89.4%		

由此可以看出，二者的 R^2 为 0.78，呈现较好的相关性；小班蓄积总量估测相对精度为 89.4%。

3.3 应用模型估算大兴沟林业局二类调查落叶松小班单位面积蓄积

基于东北虎豹公园二类小班调查本底成果，提取 2018 年开展实地调查的全部落叶松小班 266 个（绝大部分落在大兴沟林业局，小班平均面积约 7.22 hm^2 ）；叠加空地一体化调查获取的激光雷达点云数据后，获取这 266 个二类小班的航空点云数据；然后利用已建立的落叶松林分蓄积量模型估测小班单位面积蓄积量。经分析，小班蓄积估测值与小班实际调查值的散点图如图 6 所示。

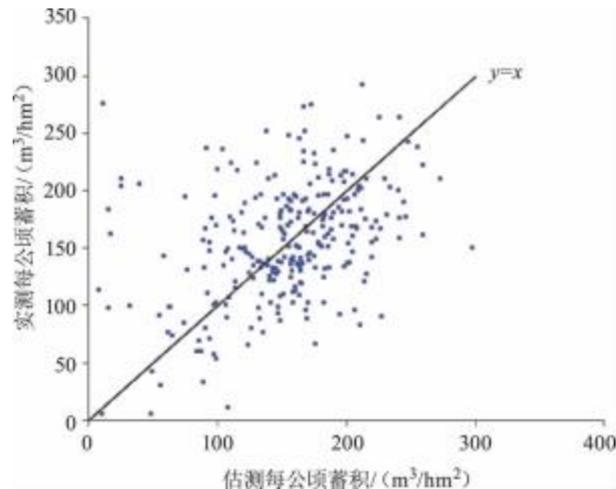


图 6 266 个落叶松小班蓄积估测与二类本底调查蓄积散点图

Fig. 6 Scatter plot of estimated volume of 266 larch subcompartments and type 2 background survey

266 个小班蓄积模型估测总量 298 627.58hm²，二类调查得到小班蓄积总量 301 914.00 hm²，相差约 3 286.42 hm²，小班蓄积总量估测相对精度为 98.9%。东北虎豹公园二类调查采用角规样地抽样推算小班蓄积、布设控制样地控制总体精度的调查方式，从总体相对精度来看，可以认为模型应用有效性较好。

4 结论与讨论

本文以东北林区广泛分布的落叶松为重点案例，探索了激光雷达调查方式下的落叶松林分蓄积量模型研建方法，并结合东北内蒙古重点国有林区二类调查成果，运用建模成果估算了该地区落叶松二类小班单位面积蓄积，是激光雷达科研模型成果在业务化应用方向上的一次有效尝试。从研究结果和研究区该树种的应用情况来看，激光点云的落叶松林分蓄积量模型预估精度达到《森林资源规划设计调查技术规程》的要求，可以在实践中推广应用。

鉴于我国地理区域差异大、森林类型多、森林状况复杂，要想建立起覆盖全国主要树种的、面向生产应用的航空蓄积表模型体系，需要十年如一日花大气力研究每个树种模型的普适性、精度以及参数的简单易得和稳定性。就本研究来说，由于经费和飞行区域受限，本次调查主要覆盖东北虎豹公园西部，东部地区较少，样本代表性有一定影响，且每个建模树种样本数均在 50 个上下。后续将采用“抽十法”或“留一法”等交叉验证方法，以提高模型稳定度。此外，本次模型应用测试范围为 266 个小班，数据量中等。后续将对整个东北虎豹公园研究区的落叶松小班(约 2 000 多个)进行模型应用和测试，分析大规模业务应用中模型精度、运算效率等方面可能出现的问题，在模型迭代应用中实现模型优化和效率提升。

参考文献：

- [1] 兰莹. 吉林省蒙古栎树高级材积表编制初探 [J]. 吉林林业科技, 2018, 47(4): 7-10.
- [2] 艾畅, 高金萍, 徐干君, 等. 新时代森林资源监测面临的形势任务和创新对策 [J]. 国家林业和草原局管理干部学院学报, 2020(2): 3-9.
- [3] Hall R J, Skakun R S, Arsenault E J, et al. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to map-ping of aboveground biomass and stand volume [J]. Forest Ecology and

Management. 2006, 225(1-3): 378-390.

[4] 王月婷, 张晓丽, 杨慧乔, 等. 基于 Landsat 8 卫星光谱与纹理信息的森林蓄积量估算 [J]. 浙江农林大学学报. 2015, 32(3): 384-391.

[5] Duncanson L I, Niemann K O, Wulder M A. Integration of GLAS and Landsat TM data for aboveground biomass estimation [J]. Canadian Journal of Remote Sensing. 2010, 36(2): 129-141.

[6] Hilker T, van Leeuwen M, Coops N C, et al. Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand [J]. Trees, 2010, 24(5): 819-832.

[7] MacLean G A, Krabill W B. Gross merchantable timber volume estimation using an airborne LiDAR system [J]. Canadian Journal of Remote Sensing. 1986, 12(1): 7-18.

[8] Keiko, Ioki, Junichi, et al. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2010, 6(1): 29-36.

[9] Giannico V, Laforteza R, John R, et al. Estimating stand volume and above-ground biomass of urban forests using LiDAR [J]. Remote Sensing, 2016, 8(4): 339.

[10] 曹林, 代劲松, 徐建新, 等. 基于机载小光斑 LiDAR 技术的亚热带森林参数信息优化提取 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 13-21.

[11] 刘浩, 张峥男, 曹林. 机载激光雷达森林垂直结构剖面参数的沿海平原人工林分特征反演 [J]. 遥感学报, 2018, 22(5): 872-888.

[12] 曾伟生, 孙乡楠, 王六如, 等. 基于机载激光雷达数据估计林分蓄积量及平均高和断面积 [J]. 林业资源管理, 2020(2): 79-86.

[13] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014-2018) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.

[14] GB/T 26424—2010, 森林资源规划设计调查技术规程 [S].