

## 河北省木兰围场国有林场植被碳汇计量方法初探

崔立志, 郭敬丽, 巩建新, 李大勇, 李孝辉

(河北省木兰围场国有林场, 河北 承德 068450)

**摘要:** 2022年7—8月, 在河北省木兰围场国有林场(以下简称木兰林场))筛选出以白桦 *Betula platyphylla*、落叶松 *Larix gmelinii*、油松 *Pinus tabulaeformis* 和蒙古栎 *Quercus mongolica* 为优势树种的样地开展森林碳汇计量活动, 在该场二类连清数据的基础上建立30个微样地, 通过对这些微样地进行调查和统计, 初步探讨森林碳汇计量的计算方法、调查方法、监测因素等。结果表明, 2022年, 木兰林场的森林蓄积量为  $833.93 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 生物量为  $733.21 \times 10^4 \text{ t}$ , 碳储量为  $377.10 \times 10^4 \text{ t}$ , 碳汇量为  $60.33 \times 10^4 \text{ t}$ , 年均碳汇量为  $12.07 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 白桦、落叶松、油松和蒙古栎4个优势树种在不同龄组的蓄积量存在较大差异, 其单位面积的生物量在不同龄组和树种之间存在一定的差异; 单位面积年均碳汇量, 油松是其他树种的数倍之多, 其次是蒙古栎, 落叶松居第三位, 表明落叶松、蒙古栎和油松在固碳和碳汇方面具有较高的潜力。本文提出的县域陆表植被碳汇计测方法初步解决了传统植被调查中耗时耗力的问题, 实现了“国家—省域—县域—乡镇—村街—地块”逐级区划的低成本高效率计测。

**关键词:** 森林碳汇; 碳汇计量; 碳汇技术; 木兰林场

中图分类号: S718.55 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2024)01-0080-07

### Preliminary Study on Forest Carbon Sink Estimation Method in Mulan Forest Farm

CUI Lizhi, GUO Jingli, GONG Jianxin, LI Dayong, LI Xiaohui

(Mulanweichang State-owned Forest Farm of Hebei Province, Chengde 068450, China)

**Abstract:** In July and August 2022, 30 sample plots were established in Mulanweichang State-owned Forest Farm in Hebei province dominated by *Betula platyphylla*, *Larix gmelinii*, *Pinus tabulaeformis* and *Quercus mongolica*, based on the forest management survey. Investigations were carried out on increment of DBH, growing stock, etc. of sample trees, and forest carbon sink were estimated. The results showed that in 2022, the forest growing stock in the Farm was  $833.93 \times 10^4 \text{ m}^3$ , biomass was  $733.21 \times 10^4 \text{ t}$ , carbon stock was  $377.10 \times 10^4 \text{ t}$ , and the carbon sink was  $60.33 \times 10^4 \text{ t}$ , with an average annual carbon sink of  $12.07 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ . The four dominant tree species in different age groups had large differences in forest growing stock, and their unit area biomass had differences among different age groups and tree species. The unit area average annual carbon sink was ordered by *P. tabulaeformis*, followed by *Qu. mongolica*, and *L. gmelinii*, which indicated that they had high potentials of sequestering and sinking carbon.

**Key words:** forest carbon sink; carbon sink estimation; carbon sink technology; Mulan Forest Farm

基于联合国粮农组织全球森林资源评估项目2020年数据源, 全球森林面积约为40.6亿 $\text{hm}^2$ , 占据了陆地总面积的近31%。森林碳汇是指森林植物吸收大气中的二氧化碳并将其固定在植被或土壤中, 以减少大气中的二

收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2023-10-18

基金项目: 2022中央财政林业科技推广项目《木兰林场植被碳汇量计算及管理平台建设》(冀TG(2022)014)

作者简介: 崔立志, 正高级林业工程师, 从事森林培育研究; E-mail: cuilizhi\_2006@163.com。

氧化碳浓度<sup>[1]</sup>。根据第九次全国森林资源清查数据(2014—2018年)显示,中国森林面积已达国土面积的22.96%,其中33%为幼龄林<sup>[3]</sup>,总森林植被碳储量达到91.86亿t。根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)2020年发布的数据,自1965年以来,全球二氧化碳年排放总量增长了2倍,从112.07亿t增长到2019年的341.69亿t<sup>[3]</sup>。为了减缓大气中二氧化碳浓度和全球温度上升的趋势,控制和减少化石燃料的二氧化碳排放,以及增加生态系统对二氧化碳的吸收,是有效应对全球气候变化的途径,也是实现“碳中和”关键因素之一。

2020年9月22日,在第七十五届联合国大会一般性辩论上,习近平主席郑重宣布中国的减排目标:中国将采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现“碳中和”。2020年12月12日,习近平主席在气候雄心峰会上通过视频发表题为《继往开来,开启全球应对气候变化新征程》的重要讲话<sup>[4]</sup>,承诺:到2030年,中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上,非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右,森林蓄积量将比2005年增加60亿m<sup>3</sup>,风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上。中共十九届五中全会、2020年中央经济工作会议、政府工作报告、中央财经委员会第9次会议等都对此项重点工作做出战略性部署,“碳达峰”“碳中和”将纳入我国生态文明建设整体布局。

准确估计和测绘森林蓄积量、生物量、碳储量和碳汇量对于制定国家和全球战略以减轻大气中的碳浓度、减轻全球气候变化至关重要<sup>[5]</sup>。近年来,学界在森林碳汇研究方面取得了重要进展,涵盖了森林固碳作用及其影响因素、森林固碳量估算方法的拓展和应用、森林碳汇的现状与潜力评估、优化、揭示森林碳汇的时空分布格局等方面<sup>[6-9]</sup>。当前区域陆地生态系统碳汇估算方法大体可分为“自下而上(Bottom-up)”和“自上而下(Top-down)”两种不同类型<sup>[10]</sup>。“自下而上”的估算方法是指将样点或网格尺度的地面观测、模拟结果推广至区域尺度,常用的“自下而上”方法包括清查法、涡度相关法和生态系统过程模型模拟法等。“自上而下”的估算方法主要指基于大气CO<sub>2</sub>浓度反演陆地生态系统碳汇,即大气反演法<sup>[11]</sup>。其中,生物量因子法作为联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)重点推荐的生物量估测方法之一,广泛应用于区域森林生物量的估测,也可用于项目级森林生物量的计算<sup>[12]</sup>。目前,常用的生物量因子主要有生物量转换与扩展因子(biomass conversion and expansion factor, BCEF)<sup>[13]</sup>、生物量扩展因子(biomass expansion factor, BEF)等<sup>[14]</sup>。尽管目前已存在多种森林碳汇计量方法,但在县域层面的森林碳汇量计测方法研究中仍存在问题。因此,本研究以河北省木兰围场国有林场的白桦 *Betula platyphylla*、落叶松 *Larix gmelinii*、油松 *Pinus tabulaeformis* 和蒙古栎 *Quercus mongolica* 为优势树种的样地,建立微样地,通过对这些微样地进行调查和统计,并对未来5年的森林碳汇量进行预测,以期探索和改进适用于县域级别的森林碳汇计量方法,以提高测量的准确性和可行性。

## 1 研究区自然概况

河北省木兰围场国有林场(以下简称木兰林场)位于河北省围场满族蒙古族自治县,地处浑善达克沙地南缘,滦河上游地区,阴山、大兴安岭和燕山余脉的交汇地带,地理坐标为41°35′~42°40′N, 116°32′~117°14′E,海拔在750~1998m。气候属于中温带向寒温带过渡类型,也是半干旱半湿润过渡地区,属于大陆性季风型高原山地气候,水热同季,冬季较长夏季较短,四季分明,昼夜温差大,年平均气温在-1.4~4.7℃,极端最高气温达38.9℃,极端最低气温达-42.9℃。无霜期为67~128d,年均降水量为380~560mm,主要分布在6—8月,此期降水量占全年降水量的69%。木兰林场阳光充足,但总体趋势是北部相较于南部较少日照<sup>[15]</sup>。

截至2021年底,木兰林场总经营面积为 $10.59 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,其中有林地面积为 $9.05 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,森林覆盖率为85.5%,林场总蓄积量为 $790.7 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,拥有丰富的森林资源。作为一家国有林场,木兰林场集林业生产经营、林业科技示范、科学试验和教学实习为一体。该场下辖12个分场,1个规划设计院,是河北省经营面积最大的国有林场。由于得天独厚的自然优势,木兰林场在林业碳汇的发展方面具有巨大潜力。

## 2 研究方法

### 2.1 研究区域

根据木兰林场 2021 年二类调查数据,我们选取了能够代表林分总体特征平均水平的地块作为样地,并进行了调查。调查区域包括木兰林场的 12 个分林场,包括北沟林场、八英庄林场、龙头山林场、四合永林场、孟滦林场、山湾子林场、桃山林场、种苗场林场、五道沟林场、克勒沟林场、新丰林场和燕格柏林场。在充分考虑木兰林场的四大树种组成后,我们筛选出以白桦、落叶松、油松和蒙古栎为优势树种的样地。在样地的选择过程中采用分层抽样的方法计算出了抽样数量,并在地图上进行了微样地点位布设设计与点位展现(图 1),最终,确定了 30 个具有代表性的微样地。外业活动时间为 2022 年 7 月 15 日—8 月 20 日。

### 2.2 数据采集方法

四边形微样地观测法的提出主要基于“互联网 3S 技术(GPS/GIS/RS)”思维,利用地理空间相似性原理,并依据森林起源、优势树种、林分年龄、郁闭度/林分密度、坡度、坡向、坡位、土壤厚度等森林小班要素,结合地理信息系统空间分析技术,将研究区域划分为同质化的林分微样地,并进行现场观测。提取并计算与林分相关的因子(如平均胸径、平均高度、林分密度和蓄积量等),以实现森林现状的监测。针对选定的微样地,定时、定点、定位和定标进行现场复测。通过比较林分因子的连续生长量,对同一区域内根据森林数表或森林模型预测数据计算得到的生长量进行检测和纠正,以实现森林资源的检测。

该技术体系以一棵具有代表性的树为中心,结合周围 4 棵树的胸径和林木间距离的测量数据,在一元材积模型的基础上推演林分的蓄积量、生长量和面积。该技术体系的研究包括微样地的布设、智能手机和条码尺的应用、SLAM 森林调查超站仪测计的使用以及微样地年度生长量的检测和纠偏<sup>[16]</sup>。

### 2.3 指标选择

以目标县域二类调查数据为基础,假设该县森林密度( $N$ )、胸径( $d$ )、树高( $H$ )和混交度( $K$ )均发生变化,乔木林蓄积量  $M$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和蓄积生长量  $\Delta M$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 的计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$M = \sum_{i=1}^j c_j \cdot \bar{d}_j^{g_j} \cdot \bar{H}_j^{f_j} \cdot N \cdot k_j$$

$$\Delta M \approx M \cdot (g_j + f_j \cdot b_j) \cdot \frac{\Delta \bar{d}_j}{\bar{d}_j} = M \cdot (g_j + f_j \cdot b_j) \cdot \bar{p}_j$$

式中,  $M$  为乔木林蓄积量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $\Delta M$  为蓄积生长量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $\bar{d}_j$  为树种  $j$  的平均胸径 (cm),  $\Delta \bar{d}_j$  为

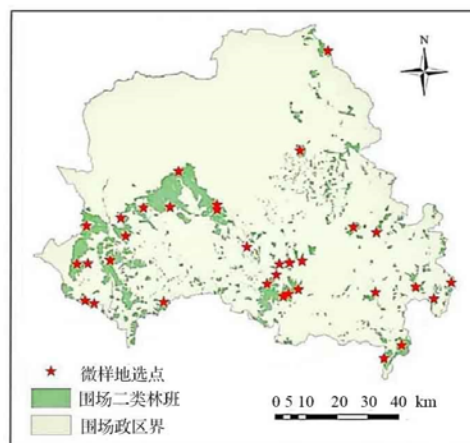


图 1 木兰林场微样地示意图

Fig. 1 Sample plots in Mulan Forest Farm

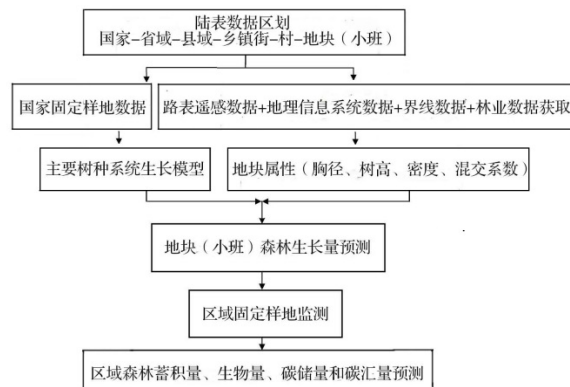


图 2 工作流程图

Fig. 2 Flow chart

树种  $j$  的平均胸径生长量 (cm),  $\overline{p_j}$  为树种  $j$  的平均年度生长率 (%),  $\overline{H_j}$  为树种  $j$  的平均高 (m),  $N$  为林分密度 (株·hm<sup>-2</sup>),  $k_j$  为树种  $j$  所占比例,  $c_j, g_j, f_j$  为树种  $j$  的材积模型参数,  $b_j$  为树种  $j$  的树高、胸径模型转换参数。

在该林场森林中抽样选取建立 30 个微样地, 选取标准木进行树芯取样, 进行年轮分析, 测量出逐年的胸径生长量, 计算每五年的蓄积生长量真值  $\Delta M_{\text{精}}$ 。结合树木特征因子 (胸径、树高)、土壤信息 (土壤厚度)、地理信息 (经度、纬度、高程、坡度、坡向、坡位)、气候气象信息 (降水量、温度)、林分条件 (郁闭度、林分密度、林分多样性), 利用生长模型和蓄积增量模型, 计算每五年的蓄积生长量预测值  $\Delta M_{\text{预}}$ 。将蓄积生长量真值和预测值结果进行对比, 按照对比结果对模型进行校正。

测定微样地年度蓄积生长量增值  $\Delta M_{\text{精}}$ , 微样地年度蓄积生长量预测值  $\Delta M_{\text{预}}$ , 建立回归模型进行修正  $\Delta M_{\text{精}} = a + b\Delta M_{\text{预}}$ , 预测精度评定  $TRE = \sum (\Delta M_{\text{精}} - \Delta M_{\text{预}}) / \sum (\Delta M_{\text{预}}) \times 100\%$  修正后总相对误差 < 15% 为优; 修正后总相对误差 15% ~ 25% 为良; 修正后总相对误差 > 25% ~ 30% 为合格; 修正后总相对误差 > 30% 为不合格。

将每个小班的生长量、净初级生产力和碳汇量进行统计, 计算该县总年度生长量、总年度生产力和总碳汇量。乔木林生物量  $B_{(t)}$  和生物量增加量  $\Delta B_{(t)}$  的计算公式如下:

$$B = p_j M + q_j$$
$$\Delta B = p_j \Delta M$$

式中,  $p_j$  为树种  $j$  的年度生长率 (%),  $b_j$  为树种  $j$  的树高、胸径模型转换参数。

乔木林碳储量  $C$  (MgC) 和碳汇量  $\Delta C$  (MgC·a<sup>-1</sup>) 测计模型:

$$C = r_j \cdot B$$
$$\Delta C = r_j \cdot \Delta B$$

式中,  $r_j$  为乔木含碳量。

3 结果与讨论

3.1 森林碳汇量

根据对 30 个微样地的调查和统计, 对木兰林场的碳汇量进行计算, 结果见表 1。2022 年, 木兰林场的森林蓄积量为  $833.93 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 生物量为  $733.21 \times 10^4 \text{ t}$ , 碳储量为  $377.10 \times 10^4 \text{ t}$ , 碳汇量为  $60.33 \times 10^4 \text{ t}$ , 年均碳汇量为  $12.07 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中孟滦林场碳汇量为  $9.53 \times 10^4 \text{ t}$ , 桃山林场碳汇量为  $8.14 \times 10^4 \text{ t}$ , 新丰林场碳汇量为  $6.73 \times 10^4 \text{ t}$ , 八英庄林场碳汇量为  $2.88 \times 10^4 \text{ t}$ , 五道沟林场碳汇量为  $3.13 \times 10^4 \text{ t}$ , 北沟林场碳汇量为  $3.96 \times 10^4 \text{ t}$ , 克勒沟林场碳汇量为  $3.23 \times 10^4 \text{ t}$ , 龙头山林场碳汇量为  $8.75 \times 10^4 \text{ t}$ , 山湾子林场碳汇量为  $1.61 \times 10^4 \text{ t}$ , 四合永林场碳汇量为  $3.29 \times 10^4 \text{ t}$ , 燕格柏林场碳汇量为  $13.87 \times 10^4 \text{ t}$ , 种苗场林场碳汇量为  $1.86 \times 10^4 \text{ t}$ 。

表 1 木兰林场各分林场碳汇量  
Tab. 1 Carbon sink in each sub-forest farm of Mulan Forest Farm

林场	碳汇量/ 10 <sup>4</sup> t	林场	碳汇量/ 10 <sup>4</sup> t	林场	碳汇量/10 <sup>4</sup> t
孟滦林场	9.53	五道沟林场	3.13	山湾子林场	1.61
桃山林场	8.14	北沟林场	3.96	四合永林场	3.29
新丰林场	6.73	克勒沟林场	3.23	燕格柏林场	13.87
八英庄林场	2.88	龙头山林场	8.75	种苗场林场	1.86

3.2 各优势树种在不同龄组的蓄积量

由表 2 表明, 木兰林场各优势树种在不同龄组的蓄积量存在较大差异。在幼龄林中, 山杨、蒙古栎、落叶松和白桦的蓄积量较高。在中龄林中, 白桦、落叶松和蒙古栎的蓄积量仍然较高。在近熟林中, 落叶松、白桦、蒙古栎和油松的蓄积量保持在较高水平。在成熟林中, 落叶松和油松的蓄积量最高。在过熟林中, 各树种的蓄

积量都有较大幅度的下降。

表 2 微样地优势树种单位面积蓄积量按龄组统计  
Tab. 2 Unit area growing stock of dominant tree species by age group in sample plots

优势树种	幼龄林 /(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	中龄林 /(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	近熟林 /(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	成熟林 /(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	过熟林 /(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	总计 /(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
椴树 <i>Tilia tuan</i>	0.16	0.34	—	—	—	0.49
胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	—	0.12	—	0.12	—	0.24
白桦	9.78	81.44	40.88	—	—	132.09
落叶松	11.95	47.61	112.91	137.82	34.45	344.75
河北杨 <i>Populus hopeiensis</i>	—	0.20	0.01	0.06	3.47	3.73
山杨 <i>P. davidiana</i>	29.72	19.04	1.87	—	—	50.63
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	0.36	3.63	1.91	2.70	0.20	8.79
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	0.31	0.04	2.57	0.57	—	3.49
色木槭 <i>Acer mono</i>	—	0.24	0.19	0.06	—	0.49
油松	1.28	6.20	28.35	137.37	21.46	194.65
蒙古栎	14.93	42.61	33.55	0.72	—	91.82
云杉 <i>Picea asperata</i>	0.95	0.55	0.73	0.53	—	2.75
春榆 <i>Ulmus davidiana</i>	—	—	—	—	—	0
硬阔	0	—	—	—	—	0
总计	69.44	202.01	222.97	279.94	59.57	833.93

3.3 各优势树种在不同龄组的生物量

由表 3 表明，与蓄积量相比，单位面积的生物量在不同龄组和树种之间存在一定的差异。在幼龄林中，山杨和蒙古栎的生物量相对较高。在中龄林和近熟林中，各优势树种的生物量整体上保持较高水平，而在成熟林，各优势树种的生物量稍有下降，在过熟林种，各优势树种的生物量有较大下降。

3.4 各优势树种在不同龄组的碳汇量

由表 4 表明，在单位面积年均碳汇量方面，油松是其他树种的数倍之多，达  $4.84 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，其次是蒙古栎，为  $3.30 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，落叶松居第三位，为  $1.96 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这表明落叶松、蒙古栎和油松在固碳和碳汇方面具有较高的潜力，对缓解气候变化和保护生态环境具有重要意义。

表 3 微样地优势树种单位面积生物量按龄组统计  
Tab. 3 Unit area biomass of dominant tree species by age group in sample plots

优势树种	幼龄林/(10 <sup>4</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	中龄林/(10 <sup>4</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	近熟林/(10 <sup>4</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	成熟林/(10 <sup>4</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	过熟林/(10 <sup>4</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	总计/(10 <sup>4</sup> t·hm <sup>-2</sup> )
椴树	0.12	0.26	—	—	—	0.39
胡桃楸	0	0.08	—	0.08	—	0.15
白桦	8.46	69.51	34.42	—	—	112.39
落叶松	10.34	42.73	102.05	124.47	31.25	310.84
河北杨	—	0.16	0.01	0.05	2.65	2.86
山杨	22.18	14.10	1.39	—	—	37.67
榆树	0.45	4.04	2.05	2.81	0.21	9.56
樟子松	0.68	0.03	1.86	0.42	—	2.99
色木槭	—	0.26	0.21	0.06	—	0.53
油松	1.64	5.03	22.79	109.39	17.01	155.85
蒙古栎	16.97	45.26	34.55	0.73	—	97.51
云杉	1.38	0.41	0.38	0.28	—	2.45
春榆	0.01	—	—	—	—	0.01
硬阔	0.01	—	—	—	—	0.01
总计	62.24	181.87	199.71	238.28	51.11	733.21

表 4 微样地优势树种单位面积碳汇量预估统计  
Tab. 4 Estimation of unit area carbon sink of dominant tree species in sample plots

优势树种	2021 年碳储量/(10 <sup>4</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	2026 年碳储量/(10 <sup>4</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	碳汇量/(10 <sup>4</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	年均碳汇量/( 10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
椴树	0.19	0.19	0	0.
胡桃楸	0.06	0.08	0.02	0
白桦	86.18	91.51	5.33	1.07
落叶松	153.76	163.55	9.79	1.96
河北杨	0.97	1.42	0.45	0.09
山杨	15.66	18.67	3.01	0.60
榆树	4.72	5.18	0.46	0.09
樟子松	1.91	2.39	0.48	0.10
色木槭	0.27	0.27	0	0
油松	59.35	83.53	24.18	4.84
蒙古栎	30.65	47.14	16.49	3.30
云杉	1.75	1.87	0.12	0.02
春榆	0	0	0	0
硬阔	0.01	0.01	0	0
总计	355.47	415.80	60.33	12.07

3.5 讨论

作为陆地生态系统的核心，森林在区域和全球碳循环中发挥着重要作用。实现“碳中和”目标后，人类的化石燃料使用量（即二氧化碳排放量）主要取决于森林碳汇的规模，因此森林碳汇在实现“中和”过程中发挥着重要作用。

本文提出的县域陆表植被碳汇计测方法初步解决了传统植被调查中耗时耗力的问题，实现了“国家—省域—县域—乡镇—村街—地块”逐级区划的低成本高效率。与传统植被调查方法相比，利用自主知识产权的“空—地—林”系列碳汇观测仪器及观测方法体系，包括轻巧便携的手持式超站仪、SLAM 样地调查系统和电动生长锥等工具，可以提高外勤工作效率，节约调查成本，这一效率和成本优势使得县域陆表植被碳汇计测方法在大规模区域尺度碳汇估算中更具可行性和应用潜力。

在后续的研究中，将致力于开发互联网+陆表植被碳汇服务平台，建立一个集 PC 网络端、手机微信端、平板智能终端等多端于一体的陆表植被碳汇信息管理及多渠道应用平台。该平台将为农林业生态发展规划决策和绿色低碳可持续发展做出贡献。通过利用先进的技术手段和信息平台，将陆表植被碳汇数据的获取和应用更加便捷和高效，为实现可持续发展目标提供支持。

4 结论

研究表明, 2022 年, 木兰林场的森林蓄积量为  $833.93 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 生物量为  $733.21 \times 10^4 \text{ t}$ , 碳储量为  $377.10 \times 10^4 \text{ t}$ , 碳汇量为  $60.33 \times 10^4 \text{ t}$ , 年均碳汇量为  $12.07 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。白桦、落叶松、油松和蒙古栎 4 个优势树种在不同龄组的蓄积量存在较大差异，其单位面积的生物量在不同龄组和树种之间存在一定的差异。单位面积年均碳汇量，油松是其他树种的数倍之多，其次是蒙古栎，落叶松居第三位，表明落叶松、蒙古栎和油松在固碳和碳汇方面具有较高的潜力。

参考文献

[1] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. Science, 2008, 320 ( 5882 ) : 1444 – 9.  
[2] 崔海鸥, 刘珉. 我国第九次森林资源清查中的资源动态研究[J]. 西部林业科学, 2020, 49 ( 5 ) : 90 – 5.  
[3] 张艳, 李锋, 李援. 碳中和背景下林业碳汇市场及海南发展林业碳汇交易研究[J]. 海南大学学报 ( 人文社会科学版 ), 2021, 39 ( 3 ) :

35–43.

- [4] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话[J]. 一带一路报道 (中英文), 2021 (01): 20–1.
- [5] LU D, CHEN Q, WANG G, et al. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems [J]. International Journal of Digital Earth, 2014, 9 (1): 63–105.
- [6] BRIENEN R J W, CALDWELL L, DUCHESNE L, et al. Forest carbon sink neutralized by pervasive growth-lifespan trade-offs [J]. Nat Commun, 2020, 11 (1): 4241.
- [7] YIN S, GONG Z, GU L, et al. Driving forces of the efficiency of forest carbon sequestration production: Spatial panel data from the national forest inventory in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 330.
- [8] KE S F, ZHANG Z, WANG YM. China's forest carbon sinks and mitigation potential from carbon sequestration trading perspective [J]. Ecological Indicators, 2023, 2: 148.
- [9] ZHAO M, YANG J, ZHAO N, et al. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013 [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 448: 528–34.
- [10] 王兴昌, 王传宽. 森林生态系统碳循环的基本概念和野外测定方法评述[J]. 生态学报, 2015, 35 (13): 4241–56.
- [11] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52 (06): 10–20.
- [12] EGGLESTON H, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. 2006.
- [13] 何潇, 雷相东. 东北地区落叶松人工林生物量转换与扩展因子空间自回归模型 [J]. 林业科学, 2021, 57 (10): 49–58.
- [14] 郑海妹, 欧光龙, 胥辉, 等. 森林生物量扩展因子研究进展[J]. 广东农业科学, 2014, 41 (20): 145–9.
- [15] 张佳音. 木兰围场北沟林场森林生态系统健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [16] 赵自雨. 林场尺度空地一体化森林生物量估测方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [17] 邱梓轩. 中国陆表森林植被碳汇测计方法与应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.