

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.023

基于地面摄影测量的平朔矿区林分蓄积量研究

黄晓东¹ 冯仲科² 王颖^{2,3}

(1. 北京联合大学应用文理学院, 北京 100191; 2. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 蓄积量是评价森林数量和质量的重要指标。为了分析露天开采和土地复垦对林分生长的影响,需要快速准确地测定开采未损区、开采受损区和受损治理区的林分蓄积量。由于矿区环境复杂多变,为了避免危险性,提出以非接触地面摄影测量方式进行外业数据采集,然后以五棵树法为原理,再结合推导形数法快速计算蓄积量的方案。为了证明地面摄影测量方法测量的精度满足林业上的精度要求,把用地面摄影测量量取的25棵树的胸径与对应每木检尺法测量的胸径结果进行对比,平均胸径绝对误差为0.23 cm,相对误差为1.35%,表明非接触地面摄影测量方法可以代替每木检尺法进行胸径测量。采用地面摄影测量结合五棵树法分别对平朔矿区开采未损区、开采受损区和受损治理区树木进行调查,结果显示受损区相对未损区平均胸径减小21.26%,蓄积量相对减小41.14%,治理区相对受损区平均胸径增加1.46%,蓄积量增加17.80%,说明露天开采影响了平朔矿区林分的平均胸径和蓄积量,尤其对蓄积量的影响较大,土地复垦一定程度上改善了树木的生长状况。

关键词: 蓄积量; 平朔矿区; 摄影测量; 五棵树法; 推导形数法

中图分类号: S758.5⁺1; S757.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0201-07

Ground Photogrammetry for Investigation of Stand Volume in Pingshuo Mining Area

HUANG Xiaodong¹ FENG Zhongke² WANG Ying^{2,3}

(1. College of Applied Arts and Sciences, Beijing Union University, Beijing 100191, China
2. Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The accumulation volume is an important indicator for evaluating the quantity and quality of forests. In order to analyze the impact of open pit mining and land reclamation on stand growth, it is necessary to quickly and accurately determine the stand volume of unaffected areas, damaged areas and treated areas. Due to the complex and varied environment of the mining area, in order to avoid danger, it was proposed to use the ground photogrammetry method to collect field data, and then use the five-tree method as the principle, and combine the derivation shape method to quickly calculate the volume of mixed forests. Comparing the DBH of the 25 trees measured by the ground photogrammetry with the DBH measured by the wooden ruler method, the absolute error of the average DBH was 0.23 cm, and the relative error was 1.35%. It was indicated that the non-contact ground photogrammetry method can replace the method of measuring the diameter of breast with each wood ruler. The ground photography and the five-tree method were used to conduct tree surveys on the unaffected areas, damaged areas and treatment areas of Pingshuo mining area. The results showed that compared with the unaffected area, the average breast diameter of the damaged area was decreased by 21.26%, and the accumulated amount was decreased by 41.14%. Compared with the damaged area, the average breast diameter of the treated area was increased by 1.46%, and the accumulated amount was increased by 17.80%. It was showed that open-pit mining affected the average DBH and accumulation of forest stands in Pingshuo mining area, especially the impact on the accumulation volume. Land reclamation improved the growth of trees to some extent.

收稿日期: 2019-01-07 修回日期: 2019-05-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(41877523、U1710123)、北京市自然科学基金面上项目(8182018)、北京市属高校高水平教师队伍支持计划高水平创新团队建设计划项目(IDHT20180515)和北京联合大学人才强校优选计划项目(BPHR2017EZ01)
作者简介: 黄晓东(1988—),男,讲师,博士,主要从事林业装备与信息化、测绘与3S技术集成研究,E-mail: huangxiaodong@buu.edu.cn
通信作者: 冯仲科(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事精准林业、测绘与3S技术集成研究,E-mail: fengzhongke@126.com

Key words: accumulation; Pingshuo mining area; ground photography; five-tree method; derivative form method

0 引言

林分蓄积量是生态环境评估的重要参数,反映林地生产力^[1]。蓄积量的测定方法主要有目测法、材积表法、标准表法、实验形数法、标准木法、遥感法和模型方法等。

最初蓄积量估测主要采用目测法或一些辅助目测方法^[2]。为了提高调查效率,在森林调查中也采用一元材积表、二元材积表和三元材积表进行调查,研究胸径、树高、干形与材积之间的关系,虽然三元材积表最准确,但使用繁杂。生产中主要使用一元、二元材积表^[3]、标准表法^[4-5]和平均实验形树法^[6]。标准表法综合了林分胸高总断面积、林分平均高和林分形数三要素,主要应用于二类调查和航空摄影测量中。实验形数法理论上稳定性较好,但是不同树种具有不同实验形数,对于混交林,计算较繁杂。当没有调查数表或调查数表的精度不达标时,也提出用标准木法^[7-8]测定蓄积量。随着对蓄积量调查精度的提升衍生出分级标准木法等多种形式,但是容易受干形因子等主观判断的影响。随着遥感技术的发展,遥感手段常应用于蓄积量参数反演和蓄积量估算中^[9-14],但蓄积量估算精度受遥感影像的质量和因子提取方法等影响,所以遥感反演往往适用于大范围估测。随着计算机技术的发展,很多学者根据已有材积表、相关调查数据和其他辅助数据进行建模^[15-20],估算林分蓄积量,但是试验区需要有大量相关数据提供。

林分蓄积量的估算方法很多,应根据具体目的和相关数据储备拟定合适的实验方法。平朔矿区立木信息数据量少,已有的遥感影像分辨率不高,地势主要为山岭,为无人机航拍带来难度,矿区环境复杂多变,存在一些陡坡,不适宜对每棵树进行实地勘测,针对这一情况,本文提出一种以非接触地面摄影测量方式进行外业数据采集,然后以五棵树法为原理,再结合推导形数法快速计算混交林蓄积量的方法。

1 数据与方法

为了更快速地计算蓄积量,本文采用非接触地面摄影测量方式进行外业数据采集。

1.1 摄影测量方式及原理

1.1.1 目标点空间坐标

共线方程是由像方像素点坐标、物方目标点坐标以及摄影机中心点三点共线建立,通过共线方程

式可以确立像方像素坐标点和待测目标点的空间坐标之间的关系,其关系表达式为

$$\begin{cases} x=f\frac{a_1(X-X_s)+b_1(Y-Y_s)+c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \\ y=-f\frac{a_2(X-X_s)+b_2(Y-Y_s)+c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \end{cases}$$

(1)

式中 (x,y) ——像方像素点坐标
 (X,Y,Z) ——物方空间坐标
 f ——摄影机内方位元素焦距
 (X_s,Y_s,Z_s) ——外方位元素线元素
可得旋转矩阵为

$$R=\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$$

当式(1)中的内外方位元素确定时,可建立物方空间坐标与像方像素坐标的函数表达式

$$A_1X=L_1$$

(2)

其中

$$A_1=\begin{bmatrix} a_1f+a_3x & b_1f+b_3x & c_1f+c_3x \\ a_2f+a_3y & b_2f+b_3y & c_2f+c_3y \end{bmatrix}$$

$$L_1=\begin{bmatrix} a_1fX_s+b_1fY_s+c_1fZ_s+a_3xX_s+b_3xY_s+c_3xZ_s \\ a_2fX_s+b_2fY_s+c_2fZ_s+a_3yX_s+b_3yY_s+c_3yZ_s \end{bmatrix}$$

$$X=\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

因本研究计算的是空间中的相对距离,因此可假设对目标点拍摄的第1幅图像的外方位元素均为0,即

$$(X_s,Y_s,Z_s)=(0,0,0)$$

$$R=\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

此时,式(2)的秩为2,而未知数为空间坐标,数值为3,此时无解。因此需增加同一目标点的另一幅图像,构建式(2)使得函数表达式的秩为4,此时有最优解。整理可得物方空间坐标与像方像素坐标的函数表达式为

$$AX=L$$

(3)

其中

$$A=\begin{bmatrix} a_1f+a_3x_1 & b_1f+b_3x_1 & c_1f+c_3x_1 \\ a_2f+a_3y_1 & b_2f+b_3y_1 & c_2f+c_3y_1 \\ a_1f+a_3x_2 & b_1f+b_3x_2 & c_1f+c_3x_2 \\ a_2f+a_3y_2 & b_2f+b_3y_2 & c_2f+c_3y_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} a_1fX_s + b_1fY_s + c_1fZ_s + a_3x_1X_s + b_3x_1Y_s + c_3x_1Z_s \\ a_2fX_s + b_2fY_s + c_2fZ_s + a_3y_1X_s + b_3y_1Y_s + c_3y_1Z_s \\ a_1fX_s + b_1fY_s + c_1fZ_s + a_3x_2X_s + b_3x_2Y_s + c_3x_2Z_s \\ a_2fX_s + b_2fY_s + c_2fZ_s + a_3y_2X_s + b_3y_2Y_s + c_3y_2Z_s \end{bmatrix}$$

当确定第 2 幅图像的外方位元素后,即可通过对式(3)进行整理,得到

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L} \tag{4}$$

可直接求得目标点的相对空间坐标。因此需合理确定第 2 幅图像的外方位元素。

1.1.2 摄影方式的确定

为提高外业过程中数据采集效率,采用上下方向正直摄影进行外业图像数据的采集。在采集过程中,首先考虑影像正直摄影的因素,其精度估算公式为

$$\begin{cases} m_x = m \sqrt{\left(k_2 - k_1 k_2 \frac{x_1}{f}\right)^2 + \left(k_1 k_2 \frac{x_1}{f}\right)^2} \\ m_z = \sqrt{2} m k_1 k_2 \\ m_y = m \sqrt{k_2^2 + 2 \left(k_1 k_2 \frac{y_1}{f}\right)^2} \end{cases} \tag{5}$$

其中 $k_1 = \frac{Z}{B}$ $k_2 = \frac{Z}{f}$

式中 m_x, m_y, m_z —— x, y, z 方向的像素测量中误差
 k_1 ——目标点与摄影基线比值
 k_2 ——摄影比例尺
 (x_1, y_1) ——测量像素坐标
 B ——摄影基线
 m ——像素测量误差

由式(5)可知影响正直摄影精度的因素有像素点坐标和摄影比例尺。

连续法相对定向,以第 1 幅图像的像空间辅助坐标系为坐标系,建立矩阵方程,此时第 2 幅图像的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos k - \sin\varphi\sin k \sin w & -\cos\varphi\sin k - \sin\varphi\sin w \cos k & -\sin\varphi\cos w \\ \cos w \sin k & \cos w \cos k & -\sin w \\ \sin\varphi\cos k + \cos\varphi\sin k \sin w & -\sin\varphi\sin k + \cos\varphi\sin w \cos k & \cos\varphi\cos w \end{bmatrix} \tag{6}$$

当旋转角度足够小时, $\mathbf{R}_2$ 可简化为

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -k & -\varphi \\ k & 1 & -w \\ \varphi & w & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

又因为 φ, w, k 为弧度,故当 φ, w, k 足够小时,可忽略不计, $\mathbf{R}_2$ 可以近似看作单位矩阵,所以当图像接近正直摄影时,可以忽略外方位元素角元素。

1.1.3 空间比例恢复

根据 1.1.2 节可确定进行正直摄影测量时,角

元素的影响很小,当相机在拍摄第 2 幅图像时,相对于拍摄第 1 幅图像相机的位置仅在竖直方向移动,则可忽略前后和左右方向的移动,在计算时假设垂直变化量为 1,建立基于垂直量为 1 的空间模型,然后恢复空间的真实比例关系。

通过试验进行分析,首先拍摄一组上下移动距离为 H 的图像,假设垂直量变化为 1,不断测量图像内任意线段的长度 d 以及实际的线段长度 M 。通过分析,可以确定 $M = \lambda d, \lambda$ 近似等于 H 。并且由于所有测量长度与实际长度成正比,因此可以确定在假设垂直变化量为 1 所得到的空间模型等于实际空间模型除以 λ 。

根据分析可知在待测区域测量一段已知真实长度的图上距离就可以恢复空间模型,因此,在拍摄时,只需保证图像内部有一段已知距离即可,测量的任何点坐标乘以比例系数 λ ,即可求出空间点坐标。

1.1.4 单株胸径

恢复空间比例后根据空间坐标点计算树木胸径及树木所在的相对坐标。假设量取胸径点坐标为 $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2)$,胸径计算式为

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \tag{8}$$

任意待测立木中心点坐标为 $((x_1 + x_2)/2, (y_1 + y_2)/2, (z_1 + z_2)/2)$ 。

1.1.5 胸径试验验证

在北京市昌平区 50 m × 50 m 样地中,共有立木 122 株,用地面摄影测量结合五棵树法测量胸径,共测 25 株,再用胸径尺测量对应的 25 株立木胸径,结果显示胸径尺测量的胸径平均值为 17.29 cm,摄影测量法测得的胸径平均值为 17.06 cm,平均绝对误差为 0.23 cm,平均相对误差为 1.35%。相比用胸径尺测量胸径,选取地面摄影测量结合五棵树法测量胸径只需按要求拍摄 10 幅图像,然后在内业对每棵树的胸径进行量算,省去实地对每棵树进行接触测量的过程,降低了环境因素造成的危险系数,减少外业工作量。

1.2 数据采集及处理

1.2.1 研究区概况

平朔矿区位于朔城区和平鲁区,南北跨越 23 km,东西横跨 22 km,是我国最主要的露天煤矿区。露天采矿导致周边以及很大半径范围内呈现地势地貌的变化,从而导致矿区气象气候、水体及地下水资源、坡度坡向、土壤状态、森林植被生长状态等发生变化。

1.2.2 样地观测及数据处理

为了比较露天开采和土地复垦对于林分生长的影响,将平朔矿区分为开采未损区、开采受损区和受

损治理区,在每个区分别设置 30 个监测样地。根据树种、胸径、树高和树龄等情况选择具有代表性的样地,来反映平朔矿区的树木生长情况。

对于每块样地,首先利用提出的摄影测量方式对待测样地进行图像采集,试验选用 FUJIFILM X100S 型普通数码相机,相机像幅为 4 896 像素 × 3 264 像素,画幅为 23.6 mm × 15.8 mm,获取样地的外业数据具体流程为:①选取一棵树作为样地的中心树,并适当调整合适的位置,确保待测区域内包括中心树在在有 5 棵树。②利用普通数码相机对标准树正直拍摄 1 幅图像,然后普通相机仅在竖直方向进行平移,依旧正直拍摄 1 幅图像,要求 2 幅图像尽量多的重复区域、图像中标准树间无遮挡,在样地间树立一个花杆。③利用手持式测树超站仪对中心树测量树高^[21]。

利用 VS2015 为开发平台,以 C#为开发语言,通过空间比例恢复、空间坐标点等原理计算树木的单株胸径和距离中心树最远立木与中心树的距离,再根据推导形数法计算单株蓄积量,最后利用五棵树法计算区域蓄积量,进而求林分蓄积量,计算界面见图 1,软件主要使用流程为:①导入相机检校文件,进行相机检校。②导入拍摄的上下 2 幅图像。③量

取花杆的图上距离,根据实际花杆长度进行空间比例恢复。④输入树种和中心树的树高,然后在图上量测胸径,计算胸径真实值。⑤根据测量的胸径边缘点,计算中心树坐标,然后计算距离中心树最远的立木与中心树的距离。⑥计算该样地的蓄积量。⑦单击保存样地内每棵树的胸径、中心树高和样地蓄积量。以此类推,计算其他样地的胸径和样地蓄积量并保存。⑧待未损区 60 幅图像处理完毕,计算未损区的平均胸径和蓄积量;依次类推,计算受损区和治理区的平均胸径和蓄积量,结果如表 1 所示,表中 $D_1 \sim D_5$ 为 1~5 号立木的胸径。

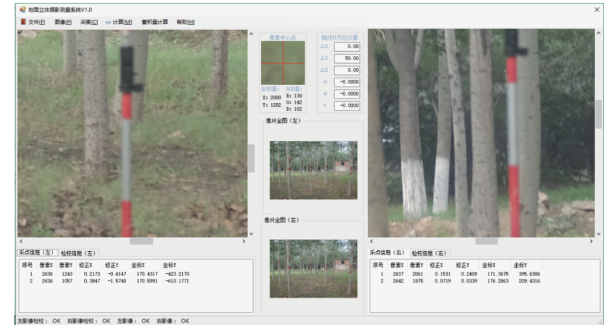


图 1 树木因子反算及蓄积量计算界面

Fig. 1 Tree factor back calculation and accumulation calculation interface

表 1 摄影测量结合五棵树法计算蓄积量结果

Tab. 1 Photogrammetry and five-tree method to calculate accumulation

样地	序号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	D_1 / cm	D_2 / cm	D_3 / cm	D_4 / cm	D_5 / cm	距离/ m	树高/ m	胸径/ cm	蓄积量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
未损区	U01	槐树	槐树	槐树	油松	槐树	16.5	13.0	15.0	6.2	18.0	4.99	5.0	13.24	19.54
	U02	杨树	杨树	杨树	杨树	杨树	4.5	3.5	3.6	3.2	3.3	2.13	5.2	3.66	7.89
	U03	榆树	榆树	榆树	榆树	榆树	10.0	10.0	7.3	7.9	4.2	8.90	10.0	8.29	4.62
	U04	旱柳	旱柳	旱柳	旱柳	旱柳	7.6	10.5	8.9	6.9	7.1	4.45	7.0	8.32	12.78
	U05	杏树	杏树	杏树	杏树	杏树	11.7	12.3	12.0	13.7	14.0	2.30	3.5	12.58	53.43
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	U30	杨树	杨树	杨树	杨树	杨树	27.5	29.8	26.0	19.8	31.0	4.84	12.4	26.26	189.37
受损区	D01	油松	油松	油松	油松	油松	8.9	4.0	3.1	4.4	6.6	3.27	2.3	5.27	3.53
	D02	油松	油松	油松	油松	油松	7.0	4.3	4.7	5.5	3.8	3.91	3.2	5.20	3.00
	D03	杨树	杨树	杨树	杨树	杨树	18.1	19.5	22.0	19.2	20.0	14.93	10.2	19.70	9.06
	D04	杨树	杨树	杨树	杨树	杨树	15.7	10.9	8.9	20.9	15.0	5.15	6.5	14.21	27.57
	D05	杨树	杨树	杨树	杨树	杨树	11.6	15.1	19.0	16.6	15.0	8.24	7.0	15.47	12.84
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	D30	杨树	杨树	杨树	杨树	杨树	24.1	22.5	8.0	23.0	15.0	5.05	13.2	18.88	104.39
治理区	T01	榆树	榆树	榆树	榆树	榆树	10.9	16.6	13.0	11.4	18.0	4.74	9.2	13.42	38.92
	T02	旱柳	旱柳	旱柳	旱柳	旱柳	12.7	10.5	10.0	8.4	15.0	7.76	7.0	10.94	7.28
	T03	榆树	榆树	榆树	榆树	榆树	13.5	14.2	14.0	13.8	17.0	8.74	9.0	14.16	12.05
	T04	柳树	槐树	槐树	槐树	槐树	17.4	15.3	11.0	19.8	12.0	7.34	7.23	15.39	16.90
	T05	杨树	杨树	杨树	杨树	杨树	29.3	8.1	11.0	11.2	9.7	9.90	13.0	14.30	18.18
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	T30	杨树	杨树	杨树	杨树	杨树	21.1	25.1	22.0	21.9	28.0	6.54	11.3	23.17	72.65

90 块样地按要求共拍摄 180 幅图像,每块样地按要求拍摄图像和测量中心树树高时间小于 3 min,

外业过程只需 2 个人协作完成。其余时间在室内进行数据处理,只需 1 个人完成,整个内业流程用时小

于 8 h。

2 结果与分析

2.1 优势树种

将样地中每棵树的树种按未损区、受损区和治理区进行汇总,如图 2 所示。3 个区共同的优势树种是杨树和榆树,其次为刺槐、旱柳和樟子松。但是国槐只存在于治理区和未损区,杏树、枫树只存在于未损区,说明露天开采和土地复垦对树种分布产生一定影响。

2.2 树木生长情况

以摄影测量和五棵树法为原理,再经过推导形数法计算平均胸径和蓄积量,将得到的数据进行统计,最后得到未损区、受损区、治理区的平均胸径和蓄积量,结果见表 2,未损区、受损区和治理区的平

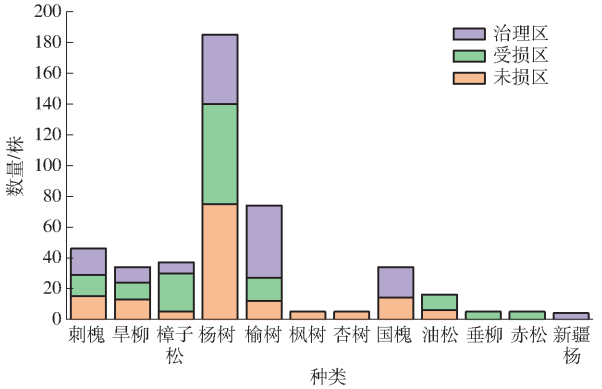


图 2 未损区、受损区和治理区树种分布

Fig. 2 Distribution of tree species in unaffected, damaged and managed areas

均胸径和蓄积量如图 3 所示。

由表 2 可知,未损区、受损区和治理区的树木生

表 2 平朔矿区树木生长情况

Tab. 2 Statistics of tree growth in Pingshuo mining area

参数	受损区			治理区			未损区		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
平均胸径/cm	5. 1	24. 0	13. 7	3. 5	24. 0	13. 9	3. 7	33. 8	17. 4
蓄积量/(m ³ ·hm ⁻²)	0. 51	104. 39	21. 69	1. 29	92. 71	25. 55	0. 30	205. 61	36. 85

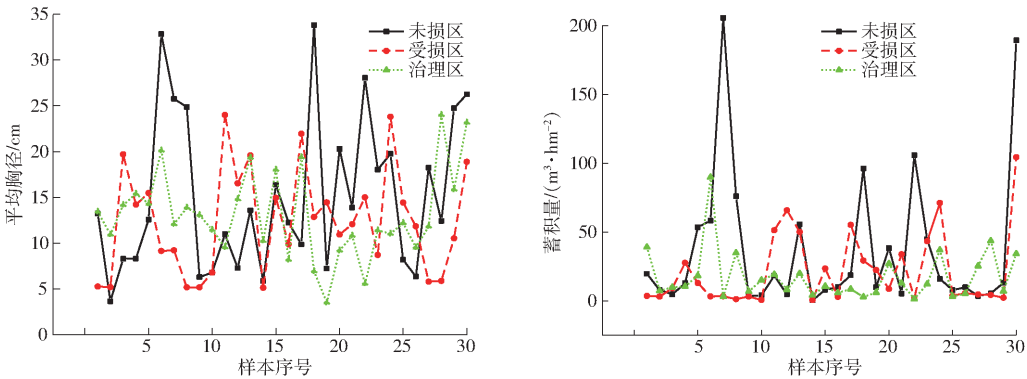


图 3 平朔矿区树木生长统计

Fig. 3 Statistics on tree growth in Pingshuo mining area

长情况,未损区的平均胸径为 17. 4 cm,受损区的平均胸径为 13. 7 cm,治理区的平均胸径为 13. 9 cm,受损区的平均胸径相比未损区减少 21. 26%,治理区的平均胸径相比受损区增加了 1. 46%。由图 3 可以看出,未损区胸径出现大值的频率更高,未损区的最大胸径为 33. 8 cm,而受损区和治理区的最大胸径都为 24. 0 cm,说明露天开采影响了树木胸径的生长。未损区的蓄积量的平均值和最大值都远大于受损区和治理区,其中未损区蓄积量平均值为 36. 85 m³/hm²,而受损区平均蓄积量为 21. 69 m³/hm²,治理区蓄积量平均值为 25. 55 m³/hm²,受损区的蓄积量相比未损区减少 41. 14%,治理区的蓄积量相比受损区增加了 17. 80%;受损区相比未损区树木的平均胸径和蓄积量都有所降低,尤其是蓄积量

减少接近原来的一半,治理区相比受损区平均胸径和蓄积量都有所升高,说明露天开采影响了矿区树木的生长,土地复垦一定程度上削弱了这一影响。

3 讨论

(1)对于一个区域大面积的混交林的调查,提出以地面摄影测量方式进行外业数据采集,然后以五棵树法为原理,再结合推导形数法快速计算蓄积量的方式,该方法在平朔矿区得到应用。为验证地面摄影测量方法计算胸径的准确性,从北京市昌平区选择 25 株立木,采用地面摄影测量计算胸径的方法与胸径尺测量胸径的方法相比,平均胸径绝对误差为 0. 23 cm,相对误差为 1. 35%,满足林业上的精

度要求,且地面摄影测量方式计算胸径的方法将部分外业工作量转移到室内,该方法为以后蓄积量估算提供了一个很好的思路。

(2)从平朔矿区树种分布分析,未损区、受损区和治理区的主要树种相同,但也存在一些不同,例如未损区和治理区存在一定量的国槐,但受损区没有国槐分布,说明土地复垦和土地治理对未损区、受损区和治理区树种分布产生了一定影响。

(3)树木的平均胸径和蓄积量都表现为未损区优于受损区和治理区,治理区优于受损区,说明露天开采阻碍了树木生长,土地复垦一定程度改善了这一现状。

4 结束语

提出了采用非接触摄影测量结合五棵树法进行树木监测,再结合推导形数法快速计算混交林蓄积量的方法,并应用在平朔矿区的调查中,该方法减少了大部分工作量,将部分外业工作转移到室内。由于矿区多变的环境,该方法用非接触摄影测量替代了对每棵树进行实地围尺测量,降低了危险性。实验结果表明,露天开采影响平均胸径和蓄积量,在蓄积量上表现尤为明显,但土地复垦一定程度上改善了这一现状,但是距离恢复到未损状态可能还需要一定时间。

参 考 文 献

[1] 杜明凤,李明军,徐海.喀斯特地区阔叶混交林蓄积的相关因子研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(11):28-31,46.
DU Mingfeng, LI Mingjun, XU Hai. Study on related factors of stand volume of broadleaved mixed forest in Karst district[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016,36(11):28-31,46. (in Chinese)

[2] 茹正忠,陈启基,潘文,等.用分层抽样结合目测调查估测林班小班蓄积量的尝试[J].林业资源管理,1972(4):14-15.
RU Zhengzhong, CHEN Qiji, PAN Wen, et al. Attempt to estimate the stock of forest banks by stratified sampling and visual survey[J]. Forest Resources Management,1972(4):14-15. (in Chinese)

[3] 庄崇洋,黄清麟,马志波,等.典型中亚热带天然阔叶林林层特征及蓄积估计研究[J].林业科学研究,2017,30(4):559-565.
ZHUANG Chongyang, HUANG Qinglin, MA Zhibo, et al. Study on characteristics and volume estimation in each stratum of typical natural broadleaved forest in mid-subtropics[J]. Forest Research,2017,30(4):559-565. (in Chinese)

[4] SPURR S H. Forest inventory[M]. New York: Ronald Press Company, 1952: 476.

[5] 陈章水. 编制标准表的理论基础是什么——与林昌庚同志商榷[J].林业科学,1965,10(1):100-108.
CHEN Zhangshui. What is the theoretical basis for compiling the standard table—discussing with comrade lin changgeng[J]. Scientia Silvae Sinicae,1965,10(1):100-108. (in Chinese)

[6] 孔雷. 金沟岭林场三种林型最优林分结构的研究[D].北京:北京林业大学,2013.

[7] 吕勇,刘辉,王才喜.杉木林分蓄积量不同测定方法的比较[J].中南林学院学报,2001,21(4):50-53.
Lǚ Yong, LIU Hui, WANG Caixi. Comparison of different measurement methods of stand volume[J]. Journal of Central South Forestry College, 2001,21(4):50-53. (in Chinese)

[8] 吴友贵,许大明.天然阔叶林蓄积量调查的误差分析与控制[J].西北林学院学报,2015,30(2):191-195.
WU Yougui, XU Daming. Error analysis and control of natural broad-leaved forest volume survey[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(2):191-195. (in Chinese)

[9] 郝泷. 基于 Landsat OLI 的西藏林芝县森林类型提取方法和蓄积量反演模型研究[D].北京:中国林业科学研究院,2017.
HE Long. Forest types extraction and growing stock volume inversion model study based on Landsat OLI images in Linzhi County, Tibet Autonomous Resion, China[D]. Beijing: China Forestry Research Institute,2017. (in Chinese)

[10] 曹霖,彭道黎,王雪军,等.应用 Sentinel-2A 卫星光谱与纹理信息的森林蓄积量估算[J].东北林业大学学报,2018,46(9):54-58.
CAO Lin, PENG Daoli, WANG Xuejun, et al. Estimation of forest stock volume with spectral and textural information from the Sentinel-2A [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018,46(9):54-58. (in Chinese)

[11] 刘俊,孟雪,温小荣,等.基于不同立地质量的森林蓄积量遥感估测[J].西北林学院学报,2016,31(1):186-191.
LIU Jun, MENG Xue, WEN Xiaorong, et al. Remote sensing estimation of forest volume based on different site qualities[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(1):186-191. (in Chinese)

[12] SHATAEEA S, WEINAKER H, BABANEJAD M. Plot-level forest volume estimation using airborne laser scanner and TM data, comparison of boosting and random forest tree regression algorithms [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 7: 68-73.

[13] 杨柳,冯仲科,岳德鹏,等.结合纹理因子和地形因子的森林蓄积量多光谱估测模型[J].光谱学与光谱分析,2017,37(7):2140-2145.
YANG Liu, FENG Zhongke, YUE Depeng, et al. Forest stock volume estimation model using textural and topographic factors of Landsat8 OLI[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2017,37(7):2140-2145. (in Chinese)

[14] APOSTOL B, LORENT A, PETRILA M, et al. Height extraction and stand volume estimation based on fusion airborne LiDAR

data and terrestrial measurements for a Norway spruce[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2016, 44(1): 313 – 323.

[15] STRAUB C, TIAN J, SEITZ R. Assessment of Cartosat – 1 and WorldView – 2 stereo imagery in combination with a LiDAR – DTM for timber volume estimation in a highly structured forest in Germany [J]. *Forestry*, 2013, 86(4): 463 – 473.

[16] 王海宾,彭道黎,范应龙,等. 基于辅助信息的森林蓄积量空间模拟[J/OL]. *农业机械学报*,2016,47(6):283 – 289. WANG Haibin, PENG Daoli, FAN Yinglong, et al. Spatial modeling of forest stock volume based on auxiliary information[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(6):283 – 289. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160637&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.037. (in Chinese)

[17] MCROBERTS R E, NÆSSET E, GOBAKKEN T. Inference for lidar-assisted estimation of forest growing stock volume [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128:268 – 275.

[18] 王少杰,邓华锋,向玮,等. 基于混合模型的油松林分蓄积量预测模型的建立[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2018,46(2):29 – 38,46. WANG Shaojie, DENG Huafeng, XIANG Wei, et al. Establishment of predicting models for *Pinus tabulaeformis* stands volume based on mixed models[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2018,46(2):29 – 38,46. (in Chinese)

[19] 王金池,邓华锋,冉啟香,等. 基于哑变量的云南松蓄积生长模型[J]. *福建林学院学报*,2017,37(4):453 – 458. WANG Jinchí, DENG Huafeng, RAN Qixiang, et al. The volume growth model of *Pinus yunnanensis* based on dummy variables[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2017,37(4):453 – 458. (in Chinese)

[20] URBANO E, MACHADO S D A, FIGUEIREDO F A, et al. Modeling of the stand volume for secondary species in native bracing forests in the metropolitan region of Curitiba, Parana, Brazil [J]. *BOSQUE*, 2018, 39(2): 227 – 237.

[21] 徐伟恒. 手持式超站测树仪研制及功能测试研究[D]. 北京:北京林业大学,2014. XU Weiheng. Study on handheld tree measurement smart station manufacture and function test[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2014. (in Chinese)

(上接第 242 页)

[19] 陆宏芳,沈善瑞,陈洁,等. 生态经济系统的一种整合评价方法:能值理论与分析方法[J]. *生态环境学报*, 2005, 14(1):121 – 126. LU Hongfang, SHEN Shanrui, CHEN Jie, et al. A synthesis evaluation method of economical-ecosystem: emergy theory and analysis method [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(1): 121 – 126. (in Chinese)

[20] 刘孝富,舒俭民,张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例[J]. *生态学报*, 2010,30(2):421 – 428. LIU Xiaofu, SHU Jianmin, ZHANG Linbo. Research on applying minimal cumulative resistance model in urban land ecological suitability assessment: as an example of Xiamen City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):421 – 428. (in Chinese)

[21] 马世发,艾彬. 基于地理模型与优化的城市扩张与优化的城市扩张与生态保护二元空间协调优化[J]. *生态学报*, 2015,35(17):5874 – 5883. MA Shifa, AI Bin. Coupling geographical simulation and spatial optimization for harmonious pattern analysis by considering urban sprawling and ecological conservation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(17):5874 – 5883. (in Chinese)

[22] 谢慧玮,周年兴,关键. 江苏省自然遗产地生态网络构建与优化[J]. *生态学报*,2014,34(22):6692 – 6700. XIE Huiwei,ZHOU Nianxing,GUAN Jian. The construction and optimization of ecological networks based on natural heritage sites in Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014,34(22):6692 – 6700. (in Chinese)

[23] VOLKOVA V V, CRISTINA L, ZHAO L, et al. Mathematical model of plasmid-mediated resistance to ceftiofur in commensal enteric escherichia coli of cattle[J]. *PLOS ONE*, 2012, 7(5):e36738.

[24] MANOJ K, SUSHILA D, PRIYANKA S, et al. Structure based in silico analysis of quinolone resistance in clinical isolates of salmonella typhi from india[J]. *PLOS ONE*, 2015, 10(5):e0126560.

[25] 陈剑阳,尹海伟,孔繁花,等. 环太湖复合型生态网络构建[J]. *生态学报*, 2015, 35(9):3113 – 3123. CHEN Jianyang, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. The complex eco-network development around Taihu Lake, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 3113 – 3123. (in Chinese)