

DOI: 10.20103/j.stxb.202309151995

刘志洋, 韩忠玲, 程勇翔, 董合干, 吴玲, 黄敬峰. 基于 CT 扫描的多枝桤柳年轮生长参数测量及验证. 生态学报, 2024, 44(20): 9401-9411.

Liu Z Y, Han Z L, Cheng Y X, Dong H G, Wu L, Huang J F. Measurement and verification of tree-ring growth parameters of *Tamarix ramosissima* based on computed tomography scanning. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9401-9411.

## 基于 CT 扫描的多枝桤柳年轮生长参数测量及验证

刘志洋<sup>1</sup>, 韩忠玲<sup>2</sup>, 程勇翔<sup>1,\*</sup>, 董合干<sup>1</sup>, 吴玲<sup>1</sup>, 黄敬峰<sup>3</sup>

1 石河子大学生命科学学院(绿洲城镇与山盆系统生态兵团重点实验室), 石河子 832003

2 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003

3 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310058

**摘要:**利用多枝桤柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.) 茎秆 CT 扫描图像, 构建年轮三维解剖模型, 获取年轮生长速率(TRGR)和年木材材积量(ATV)等生长参数。结果对树木长势评估、干旱区年轮水文响应和气候响应、林业碳汇计量等研究领域具有参考价值。研究通过对多枝桤柳茎秆 CT 扫描和平板扫描, 分别获得其茎秆 CT 和平板二维横切扫描图。使用 Python 深度学习的方法, 获得 CT 年轮 U-net 语义分割模型。结合前期研究已构建的平板扫描年轮图像 U-net 语义分割模型, 研究分别获取两种轮盘扫描图像年轮早材区域。轮盘扫描及语义分割后的结果经图像处理、GIS 配准赋坐标后, 借助 GIS 编辑和测量工具, 完成多枝桤柳年轮周长、基部断面积生长增量、TRGR 及 ATV 指标的计算。利用 CT 图像提取的年轮线状 CAD 图, 根据 CT 切片顺序和间隔, 在 Sketchup 3D 软件中重构多枝桤柳年轮三维解剖图, 立体刻画年轮结构特征。研究测量结果通过对成对样本 *t* 检验, Pearson 相关系数检验和 Bland-Altman 定量一致性分析, 评价多枝桤柳 CT 和平板扫描图年轮测量结果的一致性, 检验 CT 扫描图年轮参数的提取准确性。研究结果表明基于 CT 图像测量的 TRGR 指标和平板扫描测量结果一致。成对样本 *t* 检验 TRGR 序列定量均值比较的 *P* 值均大于 0.05, 表明两种来源所得测量结果间无统计学差异。Pearson 相关系数为 0.9984 ( $P < 0.0001$ ), 表明两种测量结果间具有强相关性。Bland-Altman 定量一致性分析, 两种测量途径中有 95.625% 的样本差异位于一致性界限内, 表明两种方法测量的结果具有一致性。基于 CT 图像通过 GIS 测量所得的多枝桤柳年轮生长参数经验证, 结果准确。研究构建的 CT 图像年轮生长参数测量方法, 可推广到农业和林业各类树木年轮参数的测量。研究结果对树木年轮无损测量技术的发展, 未来树木年木材材积量的测算, 以及利用年轮研究水文响应和气候响应具有参考价值。

**关键词:**年轮; CT 扫描; 生长速率; 年木材材积量; 三维解剖图

## Measurement and verification of tree-ring growth parameters of *Tamarix ramosissima* based on computed tomography scanning

LIU Zhiyang<sup>1</sup>, HAN Zhongling<sup>2</sup>, CHENG Yongxiang<sup>1,\*</sup>, DONG Hegan<sup>1</sup>, WU Ling<sup>1</sup>, HUANG Jingfeng<sup>3</sup>

1 College of Life Sciences, Shihezi University (Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology), Shihezi 832003, China

2 Shihezi College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi 832003, China

3 Institute of Agricultural Remote Sensing & Information Application, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

**Abstract:** Computed tomography (CT) images of stems from *Tamarix ramosissima* Ledeb. were used to construct a three-dimensional anatomical model of tree rings, and growth parameters, such as the tree-ring growth rate (TRGR) and annual timber volume (ATV) were determined. The research results have reference value for forest growth assessment and forest carbon sink measurement. In this study, CT and flat two-dimensional cross-sectional scan images of *Tamarix ramosissima* stem were obtained by CT and flat scanning, respectively. U-net semantic segmentation model of CT images was obtained using Python deep learning methods. Combining the U-net semantic segmentation model constructed in previous research for flat scan tree-ring images, early wood regions from two types of image sources were obtained, respectively. After images disc

**基金项目:**国家自然科学基金(32360369); 欧盟 Erasmus+ 项目(598838-EPP-1-2018-EL-EPPKA2-CBHE-JP)

**收稿日期:**2023-09-15; **网络出版日期:**2024-07-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengyongxiang\_613@163.com

scanning and semantic segmentation, tree-ring indexes such as the circumference, basal area increment (BAI), TRGR, and ATV index were obtained by using GIS rectifying, editing and measurement tools. Based on CAD images by using CT images extract in spaced order, three-dimensional anatomical diagrams of *Tamarix ramosissima* tree-ring were reconstructed to characterize the tree rings structure by using Sketchup 3D software. Paired-sample *t*-tests, Pearson correlation coefficients, and Bland-Altman quantitative consistency analyses were used to evaluate the consistency of the growth-ring measurements obtained from CT and flat scanning of *Tamarix ramosissima*, and to verify the accuracy of the tree-ring parameters extracted from the CT scans. The study results indicated that TRGR indexes measured by CT and flat scanning were found to be consistent. The *P*-values of the paired-sample *t*-tests for comparing the quantitative means of the TRGR sequences were all greater than 0.05, indicating that there were no significant differences between the measurement results obtained from the two image sources. The Pearson correlation coefficient between the two sets of results was 0.9984 ( $P < 0.0001$ ), indicating a highly significant correlation. The Bland-Altman quantitative consistency analysis showed that 95.625% of the sample differences between the two measurement approaches were within the limits of consistency, indicating good consistency between the results obtained by the two methods. Thus, the growth parameters of *Tamarix ramosissima* tree-ring based on CT images and measured by GIS were demonstrated to be accurate. This method can be applied to the measurement of tree-ring growth parameters of different kinds of trees in agriculture and forestry. These results provide a reference for the development of non-destructive tree-ring measurement technology and the estimation of ATV in the future.

**Key Words:** tree-ring; CT scanning; tree-ring growth rate; annual timber volume; three-dimensional anatomical map

树木年轮资料具有定年准确、追索时间长、分布广泛、分辨率高等特点,在古气候研究和认识区域环境演变过程中优势突出,是反映全球气候变化的重要指标<sup>[1]</sup>。灌木年轮材料的使用扩展了传统以乔木为主的树轮研究领域,在研究无乔木分布区域的气候变化和环境演变方面具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

准确提取年轮参数是树木年轮学及其相关领域研究的基础条件<sup>[3]</sup>。灌木多生长于林线以外,干旱荒漠和高原等生境恶劣地区,与温暖湿润地带的乔木年轮相比,生长速度缓慢,木材较紧密,年轮生长狭窄,年轮直径较小,年轮密度较高,早晚材密度差异大<sup>[4]</sup>。同时恶劣生境及遗传因素常导致灌木年轮出现缺轮,伪轮,偏心等现象,导致准确提取灌木年轮信息十分困难<sup>[5]</sup>。生长锥和茎秆取样等传统方法测量树木基部断面生长增量(Basal area increment, BAI)<sup>[6]</sup>和树轮宽度(Tree-ring width, TRW)<sup>[7]</sup>时,需对年轮条或树盘进行打磨,而干旱区一些树木受小环境影响,心材含水量偏高,加之微生物共同作用,导致部分心材木质部的质地变松软、易碎,机械强度下降<sup>[8]</sup>,这样的样品经打磨预处理后,年轮界线常难以分辨,结果影响年轮信息提取<sup>[9]</sup>。

近年来,年轮数字图像处理技术的发展大幅提高了年轮参数测量的精准度和工作效率,但研究对象多以针叶和双子叶乔木为主,针对灌木年轮的研究较少,这些方法对灌木年轮研究的应用潜力尚不明确<sup>[10]</sup>。宁霄使用 U-Net 卷积神经网络年轮图像分割算法,完成了落叶松(*Larix olgensis* Henry)平板扫描图像中的早材、晚材和树皮的精准识别<sup>[11]</sup>。孙甜甜等利用 GIS 软件实现了梭梭(*Haloxylon ammodendron*)年轮平板扫描图像中年轮宽度和面积的自动测量,年轮盘各方向轮宽测量结果与 Windendro 专业树轮测量软件测量结果相一致,证明利用 GIS 测量树木年轮参数可行,测量结果在准确性和精确性上均能满足树轮参数测量要求<sup>[12]</sup>。刘志洋等基于孙甜甜等采用的 GIS 年轮测量方法,利用多枝怪柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)年轮盘平板扫描图像,通过 U-net 图像语义分割<sup>[11]</sup>,提出并计算了树木轮盘 TRGR 指标,实验证明 TRGR 指标相比 TRW 和 BAI 指标能更准确反映多枝怪柳径向生长情况<sup>[13]</sup>。

理论上 CT 技术和 U-net 图像分割模型对提取树木年轮信息具有巨大潜力<sup>[14-15]</sup>。CT 扫描可以得到树木断面的灰度图,灰度值差异反映了木材的密度或结构变化,因此,可以用于生成年轮图像<sup>[16]</sup>。现有 CT 年轮测量手段主要用于树木内部腐烂、孔洞、开裂等缺陷的判断、测量树龄及 TRW 指标,对于提取 CT 图像中年轮周长、BAI、TRGR、ATV 等年轮参数研究较少,限制了 CT 年轮测量方法在树木年轮学中的应用<sup>[17-18]</sup>。刘帅等以 125 张杉木横切面 CT 图像为研究对象,通过改进的 U-Net++杉木 CT 图像年轮分割模型实现了对杉木 CT 图像的年轮分割<sup>[19]</sup>。Vannoppen 等对比了基于 CT 扫描和 LINTAB 专业树轮软件测量的 TRW,发现两者测量结

果无明显差异<sup>[20]</sup>。实践中,如果能将 CT 扫描、深度学习、CIS 测量和 3D 建模等多种工具和方法相结合,基于 CT 扫描图像构建年轮三维立体生长模型,计算多种年轮生长参数,结果将会对树木年轮学研究、树木长势评估<sup>[21]</sup>及森林年蓄积量估算<sup>[22]</sup>具有重要意义。

鉴于此,研究以灌木多枝桤柳为研究对象,联合 GIS 测量、CT 扫描和 U-net 图像分割方法,尝试获取专业树轮测量软件无法获取和测量的树木生长参数。通过配对  $t$  检验、Pearson 相关性检验和 Bland-Altman 一致性检验,比较 CT 扫描和平板扫描两种方法所得测量结果的一致性,验证 CT 扫描图像提取年轮生长参数的准确性。最后,基于提取的年轮生长起始线,构建多枝桤柳年轮三维生长模型,计算年木材材积量指标。研究结果对推动树木生长信息无损测量技术的发展,未来全株树木年轮 3D 生长模型的构建具有参考价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样及预处理

研究实验样品采集时间为 2022 年 3 月,采样地点位于古尔班通古特沙漠南缘 147 团,莫索湾总干渠东西两侧,地理位置(44°42'18"N,86°14'3"E)。采集时随机选择 3 株多枝桤柳,分别从其各自灌丛中选择一个分支,截取约 20 cm 长的茎秆。在实验室使用切割机(Boda M1-355)得到 a(95.5 mm)、b(125 mm)、c(95.5 mm) 3 段茎秆作为实验重复,并用于后续研究。

使用 DS600/225F100 型工业 CT 仪对所获多枝桤柳样品进行扫描。该系统主要由常规射线源、225 KV 显微射线源、面阵列探测器、运动控制系统、软件系统、图形工作站、辐防护铅房、三坐标测量仪等组成。系统微焦点采用 YXLON 公司的 FXE-225 KV 微焦点 X 光机,其中焦斑点尺寸小于 3  $\mu\text{m}$ ,管电压调节范围为 10—225 KV,电流范围为 0.02—3 mA。系统选用德国 Perkinelmer XRD1621 型非晶硅面阵列探测器,成像面积为 400 mm×400 mm。多枝桤柳样品测试前首先打开 CT 设备电源进行 1 h 探测器预热。打开运动控制柜系统电源,检查运动控制平台是否有障碍物。进入训机程序选择,根据多枝桤柳样品木材密度和射线穿透的厚度(50—80 mm)设定本实验测试电压为 180 KV,电流为



图 1 多枝桤柳茎秆 CT 扫描

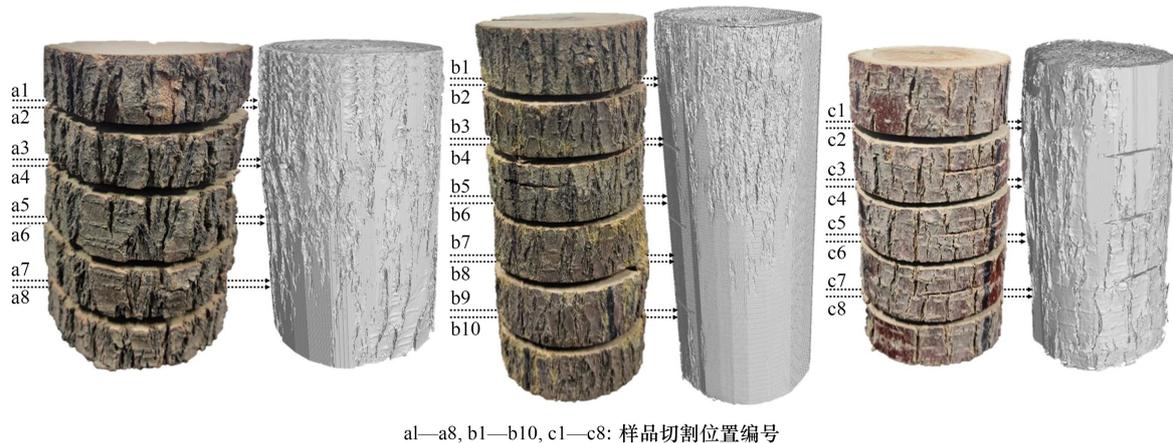
Fig.1 Computed tomography scan of *Tamarix ramosissima* Ledeb. stem

160  $\mu\text{A}$ 。打开采集运动控制程序,进行系统的初始化,根据桤柳样品高度设置采集运动距离。进行采集前校正,分为背景校正和空气校正。背景校正在不出束的时候,探测器空采本底。空气校正需要在出束情况下,按已设定的电压和电流出束,射线源只穿过空气照射在探测器上,该步骤可去除空气对测试的影响。将待检样品固定在运动控制平台中央,确保射线源中心、样品中心与探测器中心三者相对准(图 1)。关闭射线室铅房,进行 CT 图像采集。采集后的 3D 图像,按 1 mm 间隔,扫描比例 1:1,水平和垂直分辨率各为 2400 点每英寸输出多枝桤柳茎秆横截面 CT 图像,共得到 325 幅二维横截面图像。

使用 LLSL02GY-H 型激光水准仪模拟 CT 扫描,对垂直放置于水平台上的茎秆从上到下每隔 2 cm 沿激光路径用记号笔标记一圈,用锯口为 2.5 mm 的锯片沿标记位置将茎秆横向切割,打磨并记录切割位置(图 2)。使用爱普生(EPSON)V39 扫描仪,根据实际轮盘大小设置扫描区域,选择与 CT 图像相同的 2400 点每英寸分辨率,在黑暗条件下对处理好的轮盘进行扫描,得到 26 张平板扫描图像。根据锯口宽度、打磨前后轮盘高度变化以及茎秆长度,通过测算确定每个样本切割处平板扫描图像所对应的 CT 扫描图像。

### 1.2 CT 扫描和平板扫描图的 U-net 早材语义分割

为增加 CT 扫描图像中早材和晚材的辨识度,研究利用 PS 软件自动调节工具对获取的所有 CT 图像进行



a1—*a*8, b1—*b*10, c1—*c*8: 样品切割位置编号

图 2 平板扫描图和 CT 扫描图对应关系

Fig.2 Mapping between flat scanning and CT scanning

图像增强(设置图片对比度和亮度分别为 100 和-100)。从增强后的图像中,每隔 2 幅选择 1 幅,共选择 100 幅图像,使用 LabelMe 软件对这些 CT 扫描图的年轮早材区域进行标注,建立 U-net 语义分割模型训练样本数据集。为提高模型训练效率,模型训练时使用 512×512 像素的 CT 扫描图进行训练。利用训练后的多枝桤柳 CT 扫描 U-net 语义分割模型,完成 325 幅 CT 图像的年轮信息提取。基于前期研究已构建的多枝桤柳年轮平板扫描 U-Net 语义分割模型<sup>[13]</sup>,完成 26 幅平板扫描图像的年轮信息提取。在 ENVI 中对 CT 扫描图和平板扫描图的 U-net 分割结果分别进行图像重采样,使其恢复到原始图像分辨率,结果用于后续年轮生长参数的测量。

### 1.3 TRGR 测量与三维生长模型构建

在 PS 中将 CT 扫描与 U-net 分割结果图进行叠置,以与 CT 扫描图相对应的平板扫描图的大小设置选择框,选择框居中后使用剪裁工具按像素进行剪裁。裁剪后平板扫描图和 CT 扫描图及两者 U-net 分割结果图的行列数相一致。研究基于孙甜甜等已验证的 GIS 年轮测量方法,完成多枝桤柳 CT 扫描和平板扫描图的年轮参数测量,获取 BAI 和 TRGR 等年轮指标。在 GIS 中,将 CT 图像获取的各年轮生长起始线矢量图另存为 DWG 格式的 CAD 图。在 SketchUp 3D 软件中,使用移动工具按 CT 扫描顺序和间隔(1 mm)将各层年轮生长起始线 CAD 图进行堆叠,构建多枝桤柳年轮三维解剖图,立体刻画年轮生长结构特征,并计算多枝桤柳茎秆的年木材材积量(Annual timber volume, ATV)。

$$ATV_j = \sum_{i=1}^n \frac{(BAI_i + BAI_{i+1})}{2} \times h \quad (1)$$

式中:ATV<sub>*j*</sub>表示第*j*年木材材积量,单位为mm<sup>3</sup>;BAI<sub>*i*</sub>和BAI<sub>*i+1*</sub>分别表示 CT 图像切片中第*i*层和第*i+1*层第*j*年的年轮环面积,单位为mm<sup>2</sup>;h 表示相邻 CT 图像取样间距,研究中该值为 1 mm。

### 1.4 结果验证

研究利用 SPSS 23.0 及 Medcalc 统计分析软件,采用配对 *t* 检验、Pearson 相关系数和 Bland-Altman 图分析法,比较两类图像来源(平板和 CT 扫描图)测量所得年轮生长参数的一致性,以此检验基于 CT 图像测量结果的准确性。

## 2 结果与分析

### 2.1 多枝桤柳平板和 CT 扫描轮盘 U-net 语义分割效果比较

从两个 U-net 模型对各自图像的分割效果看,所得结果都能较准确的提取出多枝桤柳年轮早材信息(图 3)。相比较平板扫描轮盘制备过程更为复杂,考虑加工厚度和样品打磨消耗,轮盘制备不宜过薄,因此,

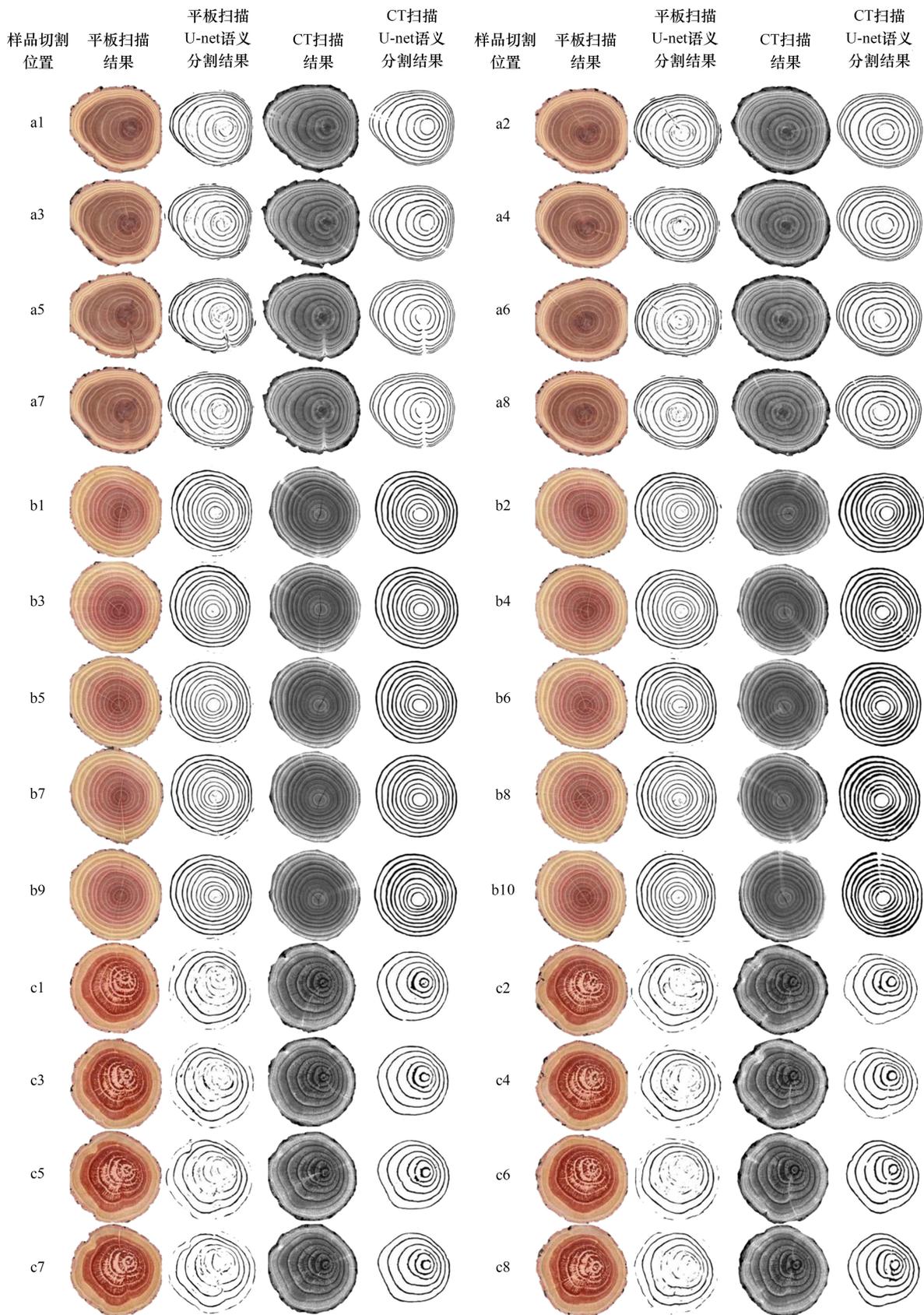


图3 平板扫描、CT扫描及U-net语义分割结果

Fig.3 The results of flat scanning, CT scanning and U-net image semantic segmentation

研究中制备数量有限。另外,受心材含水量和微生物的共同影响,个别多枝桤柳木质部心材易变松软,机械强度降低,对这类样品打磨操作会导致树心区域早晚材界限模糊(图 3),影响平板年轮扫描盘 U-net 语义分割效果。相比较,CT 扫描所得轮盘,不受切割,打磨等预处理影响,在不破坏样品的情况下,依据反映密度差异的灰度值对 CT 图像进行早材分割,能有效减少木质部质地变化对年轮信息提取效果的影响,所得年轮环线更为完整和清晰(图 3)。另外,基于 CT 扫描年轮信息提取的完整度高,减少了后续年轮参数测量的工作量(对分割不完整的区域,年轮参数测量过程中需对照原始扫描图像,在 GIS 中手动断开和连接早材生长起始线),降低了人为误差。

2.2 多枝桤柳平板和 CT 扫描轮盘 TRGR 测量结果与验证

两种方法在同一茎秆不同位置测量所得 TRGR 序列的趋势基本一致,符合在树木主干无侧枝和明显弯曲的一段茎秆的一定距离内,不同位置树木年径向生长速率基本一致的规律,表明依据 CT 扫描图测量的年轮参数准确(图 4—图 6)。

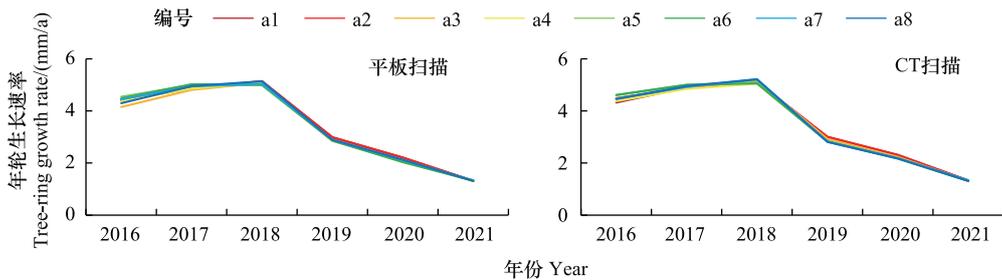


图 4 a 样本 TRGR 测量结果

Fig.4 The results of TRGR measurements in specimen a

TRGR: 年轮生长速率 Tree-ring growth rate

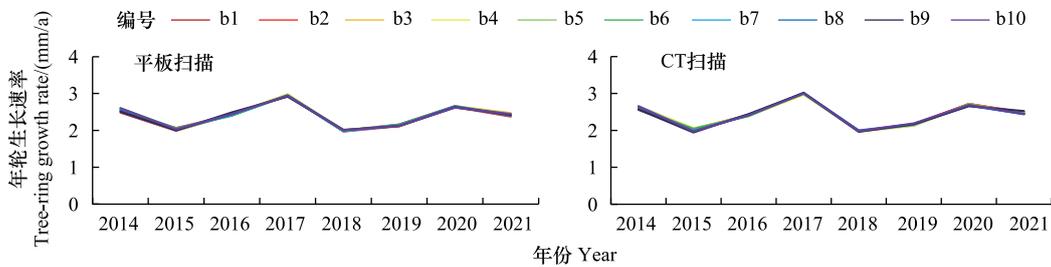


图 5 b 样本 TRGR 测量结果

Fig.5 The results of TRGR measurements in specimen b

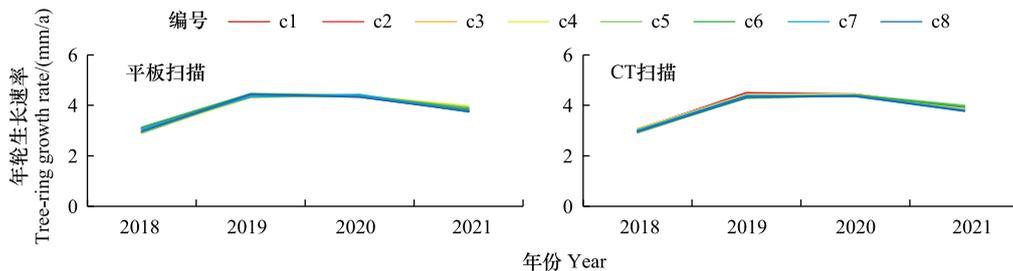


图 6 c 样本 TRGR 测量结果

Fig.6 The results of TRGR measurements in specimen c

测量结果经配对 *t* 检验得出,两种扫描图测量 TRGR 序列定量均值比较的 *P* 值均大于 0.05,表明两种来源所

得测量结果无统计学差异。进一步对比发现,通过 CT 扫描图测量的 TRGR 的结果整体略高于平板扫描图(表 1)。分析差异来源于平板扫描图中早晚材边界色彩过度的均一性低于 CT 扫描图,使得基于平板扫描所得早材边界更为曲折,年轮生长起始线的测量结果偏大,造成平板扫描计算的 TRGR 值略低于 CT 扫描所得结果。

表 1 多枝桤柳平板和 CT 扫描轮盘 TRGR 测量结果均值比较统计表

Table 1 Statistical table comparing the mean value of TRGR measurements between flat and CT scan images

编号 Order	平均值±标准差 Mean±standard deviation	配对差值 Paired difference		<i>t</i>	<i>P</i>
		平均值±标准差 Mean±Standard deviation	95%的置信区间 95% confidence interval		
a1(F)	3.485±1.553				
a1(CT)	3.523±1.550	-0.037±0.047	-0.0863-0.0120	-1.94	0.11
a2(F)	3.491±1.559				
a2(CT)	3.527±1.556	-0.035±0.054	-0.0921-0.0218	-1.59	0.17
a3(F)	3.386±1.532				
a3(CT)	3.463±1.563	-0.076±0.116	-0.1985-0.0459	-1.61	0.17
a4(F)	3.432±1.569				
a5(CT)	3.462±1.561	-0.029±0.039	-0.0700-0.0114	-1.85	0.12
a5(F)	3.462±1.600				
a6(CT)	3.508±1.618	-0.046±0.070	-0.1191-0.0272	-1.61	0.17
a6(F)	3.456±1.604				
a7(CT)	3.505±1.614	-0.048±0.091	-0.1434-0.0467	-1.32	0.25
a7(F)	3.465±1.573				
a8(CT)	3.495±1.612	-0.030±0.082	-0.1167-0.0559	-0.91	0.41
a8(F)	3.454±1.580				
a8(CT)	3.498±1.607	-0.044±0.084	-0.1322-0.0433	-1.3	0.25
b1(F)	2.390±0.334				
b1(CT)	2.424±0.360	-0.038±0.056	-0.0845-0.0083	-1.94	0.09
b2(F)	2.382±0.330				
b2(CT)	2.428±0.360	-0.046±0.061	-0.0971-0.0056	-2.11	0.07
b3(F)	2.405±0.326				
b3(CT)	2.410±0.344	-0.005±0.047	-0.0438-0.0341	-0.29	0.78
b4(F)	2.395±0.343				
b4(CT)	2.415±0.341	-0.020±0.046	-0.0584-0.0185	-1.23	0.26
b5(F)	2.395±0.322				
b5(CT)	2.407±0.354	-0.013±0.038	-0.0443-0.0191	-0.94	0.38
b6(F)	2.399±0.330				
b6(CT)	2.414±0.352	-0.015±0.032	-0.0417-0.0116	-1.34	0.22
b7(F)	2.389±0.333				
b7(CT)	2.418±0.364	-0.029±0.045	-0.0658-0.0088	-1.81	0.11
b8(F)	2.389±0.333				
b8(CT)	2.410±0.355	-0.022±0.040	-0.0554-0.0119	-1.53	0.17
b9(F)	2.384±0.323				
b9(CT)	2.390±0.346	-0.007±0.057	-0.0541-0.0409	-0.33	0.75
b10(F)	2.398±0.328				
b10(CT)	2.388±0.360	0.010±0.053	-0.0388-0.0541	0.52	0.6
c1(F)	3.903±0.328				
c1(CT)	3.959±0.658	-0.056±0.056	-0.1452-0.0336	-1.99	0.14
c2(F)	3.874±0.682				
c2(CT)	3.943±0.682	-0.068±0.056	-0.1575-0.0207	-2.44	0.09

续表

编号 Order	平均值±标准差 Mean±standard deviation	配对差值 Paired difference		<i>t</i>	<i>P</i>
		平均值±标准差 Mean±Standard deviation	95%的置信区间 95% confidence interval		
c3(F)	3.888±0.687				
c3(CT)	3.938±0.642	-0.050±0.062	-0.1497-0.0489	-1.62	0.21
c4(F)	3.910±0.558				
c4(CT)	3.924±0.652	-0.014±0.096	-0.1660-0.1378	-0.3	0.79
c5(F)	3.900±0.694				
c5(CT)	3.909±0.660	-0.014±0.074	-0.1322-0.1039	-0.38	0.73
c6(F)	3.954±0.616				
c6(CT)	3.901±0.648	0.053±0.124	-0.1444-0.2505	0.86	0.46
c7(F)	3.889±0.633				
c7(CT)	3.906±0.662	-0.017±0.079	-0.1425-0.1086	-0.43	0.7
c8(F)	3.875±0.671				
c8(CT)	3.879±0.670	-0.004±0.016	-0.0292-0.0207	-0.54	0.63

TRGR: 年轮生长速率 Tree-ring growth rate; a1(F)—a8(F), b1(F)—b10(F), c1(F)—c8(F); 切割处平板扫描图编号; a1(CT)—a8(CT), b1(CT)—b10(CT), c1(CT)—c8(CT); CT 扫描图编号

结果经 Pearson 相关检验得出, 平板和 CT 两种方法测量所得 TRGR 值间呈线性关系 ( $r = 0.9984$ ,  $P < 0.0001$ ), 表明两种方法测量的 TRGR 具有强相关性 (图 7)。

结果经 Bland-Altman 定量一致性分析得出, 两种方法测量 TRGR 定量差值的均数为  $-0.02680$  mm/a, 一致性界限为  $-0.1493$ — $0.09569$  mm/a。两种测量途径中有 95.625% (7/160) 的差异位于一致性界限内, 表明两种方法测量 TRGR 定量具有一致性。图 8 中上下两条红色虚线代表 95% 一致性界限的上下限, 中间蓝色实线代表两种方法测量 TRGR 定量差值的均数。

研究经上述分析得出, 基于 CT 扫描图像的多枝桤柳 TRGR 参数测量结果准确, 研究结果可以满足年轮三维模型构建和年木材材积量测量需求。

### 2.3 多枝桤柳年轮三维模型构建与年木材材积量的测量

研究利用 Sketchup 3D 建模软件, 基于逐层 CT 切片年轮信息提取结果和空间位置信息, 重构多枝桤柳年轮三维模型, 结果如图 9 所示。利用公式 1 计算出三个样品各年木材材积量, 结果如图 10—图 12 所示。比较发现年木材材积量测量结果与图 4—图 6 中 TRGR 测量结果趋势基本一致, 该结果与理论预期相符合。

## 3 讨论

本研究针对灌木年轮的特点, 利用工业 CT 扫描仪, 结合 U-net 深度学习网络和 GIS 测绘工具, 成功提取了干旱区典型植物多枝桤柳年轮 TRGR、ATV 等多项生长参数, 方法弥补了专业树轮测量软件的不足。同时, 该方法基于干旱区灌木年轮年轮密度较高, 早晚材密度差异大的特点, 结合 CT 扫描和数字图像处理技术, 弥补了平板扫描树木年轮测量中因年轮组织质地变松软、易碎, 年轮样本打磨后边界难以辨认的问题。研究结

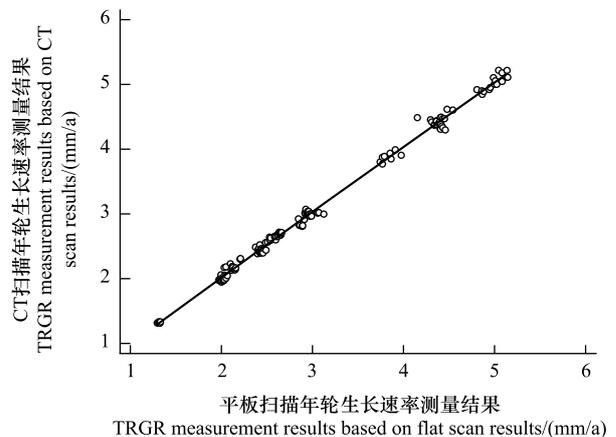


图 7 基于两种图像来源的 TRGR 测量结果相关性分析

Fig.7 The correlation analysis of TRGR measurement results based on two types of scanning images

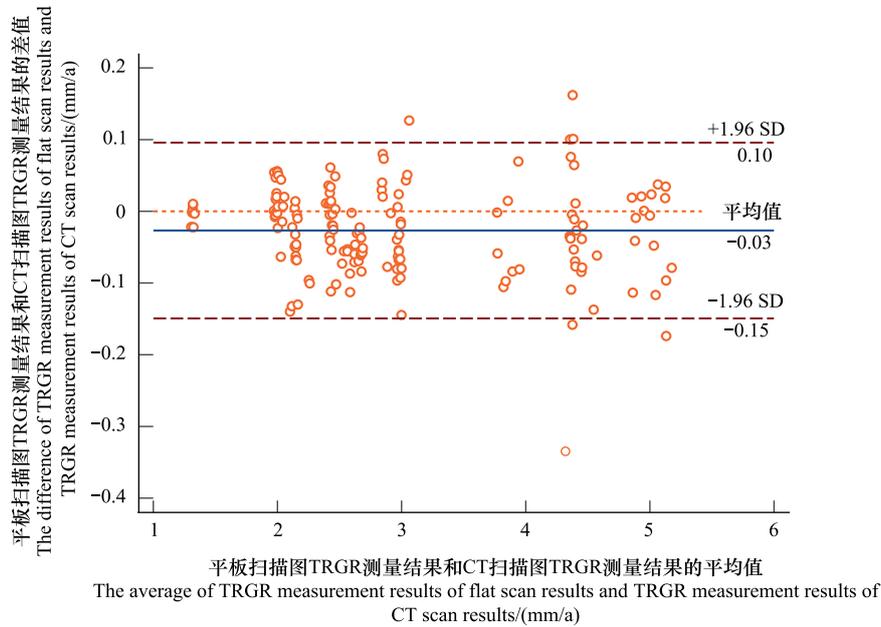


图 8 基于两种图像来源的 TRGR 测量结果定量一致性分析

Fig.8 The quantitative consistency analysis of TRGR measurement results based on two types of scanning images

果为进一步利用灌木年轮资料进行气候变化和环境演变等研究,提供了新的测量手段和方法。

目前,构建树木生长模型和测量树木年木材材积量的研究较少,研究方法主要分为两类:一是基于树木生长与林分因子、生长环境之间的相关性,构建树木生长模型来预测树木的胸径、树高和材积量<sup>[23]</sup>;二是利用 TRW,BAI,冠幅,树高和遥感等数据建立数学模型分析树木生长特征<sup>[24]</sup>。范曾<sup>[25]</sup>在树木生长发育模型中引入光照条件完善驱动生长机制,提出基于树木生物力学的树枝构建方式,能够在一定程度上合理地表示树枝的弯曲现象。侯天皓等<sup>[26]</sup>利用不同树龄雪岭云杉树木胸高断面面积增长量(BAI),建立 ARIMA 模型分析了雪岭云杉径向生长过程。以上研究主要利用部分树木径向生长信息或树木生长和环境因子的关系,推测模拟树木生长情况,缺少对树木完整茎秆生长参数和年木材材积量的准确测量。

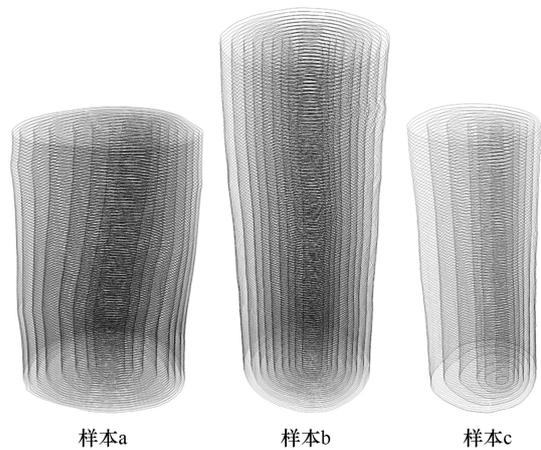


图 9 多枝桤柳茎秆生长模型

Fig.9 Stem growth model of Tamarix ramosissima

研究以多枝桤柳茎秆为研究对象,利用 GIS 和 SketchUp 软件构建茎秆的三维生长模型。该模型可较完整的反映受试材料纵向和径向生长状况。结合公式 1 可较准确的测量出年木材材积量。若能结合利用树轮密度分析系统<sup>[27-28]</sup>,将 CT 图像中光学信号转化为树轮密度信号,把得到的树轮早晚材密度值引入该生长模型,有望得到更能反映树木实际生长变化情况的三维模型,结果对树木生长分析、树木碳汇计量等研究具有参考价值。

研究构建的 CT 年轮参数测量方法,虽然减少了传统年轮研究中材料的打磨、扫描工序,但方法整体工作较为繁重;目前,尚缺乏对 GIS、Python、SketchUp 等软件功能的系统整合;测量年轮参数和构建树木生长模型时仍基于裁切茎秆展开,对树木具有破坏性。Onoe M 等<sup>[29]</sup>于 1984 年曾研制了一种新型便携式 X 射线计算机断层扫描仪,可用于野外环境下活立木等的无损测量,该扫描仪最大可容纳直径 100 cm 的测试对象,但该

研究后续报道较少。Rumboldt 等<sup>[30]</sup>发明了一种用于临床成像的便携式 CT 扫描仪,该仪器由带多段探测器的支架和可拆卸的台面组成,既可以扫描头部,也能进行全身扫描,目前仅用于医疗领域。今后如果能将便携式 CT 扫描仪与本研究测量年轮参数、构建树木生长模型的方法相结合,研制野外便携式活立木年轮自动测量仪,无疑可推进树木年轮测量学及其相关领域的技术革新。

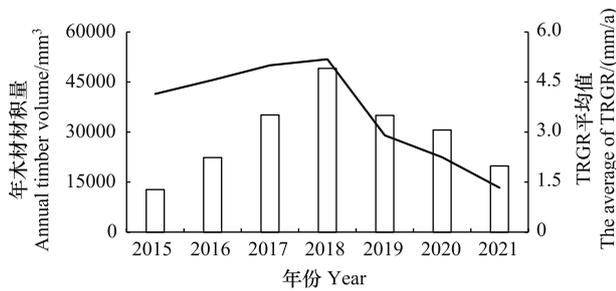


图 10 样本 a 年木材材积量测量结果

Fig.10 The measurement results of annual timber volume for specimen a

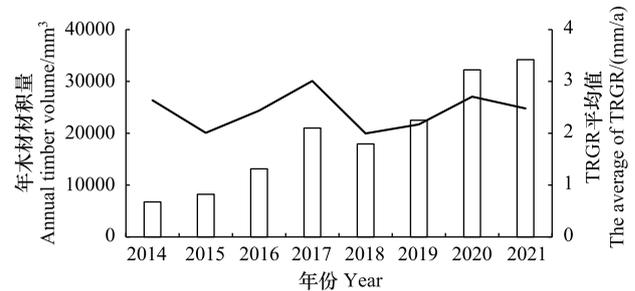


图 11 样本 b 年木材材积量测量结果

Fig.11 The measurement results of annual timber volume for specimen b

#### 4 结论

联合 GIS 测量、CT 扫描和 U-net 图像分割,成功提取干旱区典型植物多枝桧柳年轮 BAI、TRGR 和 ATV 等多项生长参数。测量结果经成对样本  $t$  检验, Pearson 相关系数检验和 Bland-Altman 定量一致性分析,表明基于 CT 图像测量的多枝桧柳年轮生长参数结果准确。利用 Sketchup 3D 软件重构了多枝桧柳茎秆的年轮三维解剖图,基于此精确计算了多枝桧柳茎秆的年木材材积量。构建的 CT 图像年轮生长参数测量方法和树木生长模型构建方法,可适用于其他树木年轮学研究。研究结果对促进树木年轮无损测量技术的发展,树木精确生长模型的构建,树木年木材材积量的准确测量具有参考价值。

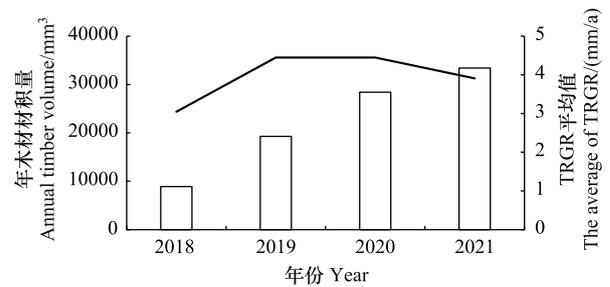


图 12 样本 c 年木材材积量测量结果

Fig.12 The measurement results of annual timber volume for specimen c

#### 参考文献 (References):

- [1] 肖生春, 彭小梅, 丁爱军, 田全彦, 韩超. 中国寒旱区灌木年轮学研究进展. 地球科学进展, 2020, 35(6): 561-567.
- [2] Myers-Smith I H, Elmendorf S C, Beck P S A, Wilmking M, Hallinger M, Blok D, Tape K D, Rayback S A, Macias-Fauria M, Forbes B C, Speed J D M, Boulanger-Lapointe N, Rixen C, Lévesque E, Schmidt N M, Baittinger C, Trant A J, Hermanutz L, Collier L S, Dawes M A, Lantz T C, Weijers S, Jørgensen R H, Buchwal A, Buras A, Naito A T, Ravolainen V, Schaepman-Strub G, Wheeler J A, Wipf S, Guay K C, Hik D S, Vellend M. Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome. Nature Climate Change, 2015, 5: 887-891.
- [3] 黄敬文, 代鑫, 张冬有. 树木年轮学新前沿和在中国的研究进展. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2022, 38(6): 79-86.
- [4] 姚雪玲, 姜丽娜, 李龙, 王锋, 吴波, 郭秀江. 浑善达克沙地 6 种灌木生物量模拟. 生态学报, 2019, 39(3): 905-912.
- [5] Myers-Smith I H, Hallinger M, Blok D, Sass-Klaassen U, Rayback S A, Weijers S, Trant A J, Tape K D, Naito A T, Wipf S, Rixen C, Dawes M A, Wheeler J A, Buchwal A, Baittinger C, Macias-Fauria M, Forbes B C, Lévesque E, Boulanger-Lapointe N, Beil I, Ravolainen V, Wilmking M. Methods for measuring Arctic and alpine shrub growth: a review. Earth-Science Reviews, 2015, 140: 1-13.
- [6] Gazol A, Rozas V, Cuende Arribas S, Alonso Ponce R, Rodríguez-Puerta F, Gómez C, Olano J M. Stand characteristics modulate secondary growth responses to drought and gross primary production in *Pinus halepensis* afforestation. European Journal of Forest Research, 2023, 142(2): 353-366.
- [7] Stolz J, Forkel M, van der Maaten E, Martin J, van der Maaten-Theunissen M. Through eagle eyes—the potential of satellite-derived LAI time

- series to estimate mastings events and tree-ring width of European beech. *Regional Environmental Change*, 2023, 23(2): 74.
- [ 8 ] 热依拉·木民. 塔里木河下游胡杨树树干空心特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [ 9 ] Ding A J, Xiao S C, Tian Q Y, Han C. Correcting eccentric growth rings using basal area increment: a case study for a desert shrub in northwestern China. *Tree-Ring Research*, 2021, 77(1): 1-9.
- [ 10 ] 赵娟娟, 郭志成, 苏芳, 赵亚明. 基于数字图像法树木年轮宽度测量方法研究. *工业仪表与自动化装置*, 2017(6): 75-77, 96.
- [ 11 ] 宁霄, 赵鹏. 基于 U-Net 卷积神经网络的年轮图像分割算法. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1580-1588.
- [ 12 ] 孙甜甜, 蔡茜茜, 孙洋, 程勇翔, 黄敬峰. 基于 GIS 的梭梭年轮测量方法. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3680-3686.
- [ 13 ] 刘志洋, 孙甜甜, 赵恒明, 韩忠玲, 程勇翔, 刘彤, 王绍明, 黄敬峰. 多枝桧柳年轮生长速率测量及 TRGR 指标优势分析. *生态学报*, 2023, 43(7): 2915-2926.
- [ 14 ] 董义华, 台流臣. 木材 CT 断层图像中的年轮自动检测方法研究. *林业机械与木工设备*, 2019, 47(3): 7-11.
- [ 15 ] Stelzner J, Million S, Stelzner I, Martinez-Garcia J, Gwerder D, Nelle O, Schuetz P. Non-destructive dendrochronology with X-ray computed tomography: the influence of different conservation methods for waterlogged archaeological wood. *Dendrochronologia*, 2023, 78: 126065.
- [ 16 ] 刘杰, 董彦君, 李宗善. 灌木年轮生态学研究进展. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1699-1708.
- [ 17 ] 虞玥洋. X 射线计算机断层扫描在历史木材研究中的应用[D]. 南京: 南京艺术学院, 2021.
- [ 18 ] 高欣, 杨立新, 陈振举. 基于树木年轮径切特征的卷积神经网络树种识别. *应用生态学报*, 2023, 34(1): 47-57.
- [ 19 ] 刘帅, 葛浙东, 刘晓彤, 高宜生, 李阳, 李萌菲. 改进 UNet++ 的杉木 CT 图像年轮分割. *计算机工程与应用*, 2024, 60(5): 232-239.
- [ 20 ] Vannoppen A, Maes S, Kint V, De Mil T, Ponette Q, Van Acker J, Van den Bulcke J, Verheyen K, Muys B. Using X-ray CT based tree-ring width data for tree growth trend analysis. *Dendrochronologia*, 2017, 44: 66-75.
- [ 21 ] Zhang W Y, Wang Y, Xiao J Y, Lyu L X. Species-specific coupling of tree-ring width and litter production in a temperate mixed forest. *Forest Ecology and Management*, 2022, 504: 119831.
- [ 22 ] 张欣. 基于树木年轮信息的北京园林树木碳固定研究. 河北: 河北农业大学, 2021.
- [ 23 ] 马学欣, 严耿坤, 王锋, 侯建花. 基于 GA-BP 神经网络的树木生长模型研究. *绿色科技*, 2022, 24(15): 185-190.
- [ 24 ] Chen G, Thill J C, Anantsuksomsri S, Tontisirin N, Tao R. Stand age estimation of rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations using an integrated pixel- and object-based tree growth model and annual Landsat time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 144: 94-104.
- [ 25 ] 范曾. 基于树木生长发育模型的自动建模算法[D]. 成都: 四川大学, 2021.
- [ 26 ] 侯天皓, 姜盛夏, 王勇辉, 张同文, 喻树龙, 王兆鹏, 郭冬, 如先古丽·阿不都热合曼, 宋京徽. 不同树龄雪岭云杉径向生长变化特征与模拟研究. *林业科学研究*, 2023, 36(3): 11-21.
- [ 27 ] 姚建峰, 符利勇, 宋新宇, 王雪峰, 赵燕东, 郑一力, 业巧林, 翟胜楠. 微钻阻力法测量早晚材密度的可行性试验. *林业工程学报*, 2022, 7(05): 66-73.
- [ 28 ] 张辉, 张芸, 胡亚楠, 颜耀, 吴鹏飞, 曾爱聪, 马祥庆. 气候变暖背景下杉木年轮密度对气候因子的响应. *生态学报*, 2021, 41(4): 1551-1563.
- [ 29 ] Onoe M, Tsao J W, Yamada H, Nakamura H, Kogure J, Kawamura H, Yoshimatsu M. Computed tomography for measuring the annual rings of a live tree. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1984, 221(1): 213-220.
- [ 30 ] Rumboldt Z, Huda W, All J W. Review of portable CT with assessment of a dedicated head CT scanner. *AJNR American Journal of Neuroradiology*, 2009, 30(9): 1630-1636.