

DOI: 10.20103/j.stxb.202412193122

王兴豪, 韩忠玲, 刘志刚, 程勇翔, 董合干, 吴玲, 黄敬峰. 梭梭生长轮纹理特征的提取与分析. 生态学报, 2025, 45(17): - .

Wang X H, Han Z L, Liu Z G, Cheng Y X, Dong H G, Wu L, Huang J F. Extraction and analysis of growth ring texture characteristics of *Haloxylon ammodendron*. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

梭梭生长轮纹理特征的提取与分析

王兴豪¹, 韩忠玲², 刘志刚⁴, 程勇翔^{1,*}, 董合干¹, 吴玲¹, 黄敬峰³

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

4 重庆真测科技股份有限公司, 重庆 400030

摘要:为了解析梭梭(*Haloxylon ammodendron*)茎秆横切面特殊的纹理结构,研究基于 CT 扫描图像,通过对梭梭生长轮快速生长带外包络线的提取,重建了生长轮三维影像,从三维纹理结构揭示出二维横切纹理结构的成因。研究发现,梭梭快速生长轮之间存在着直接连接,即各轮层导管间存在横向连通。研究将相邻生长轮导管之间的跨连结构命名为连桥结构,该结构是梭梭实现水分横向运输的高效通道。梭梭次生木质部缺少木射线,其水分横向运输功能由连桥结构组成的横向运输系统所完成。连桥结构也是造成梭梭横切面纹理呈现断续螺旋线的原因。梭梭连桥结构分为横向和纵向两种基本层间跨连模式。横向连桥在快速生长轮造成的近椭圆形不连续开口面积平均值为 0.51 mm^2 ,纵向连桥造成的不连续开口面积平均值为 0.17 mm^2 。平均 6—7 个连桥串联形成连桥组,并成辐射状分布于梭梭次生木质部中,连桥组中多数呈现向上倾斜,少数向下倾斜,倾斜角度在 $\pm 13.2\text{—}17.46^\circ$ 之间。由连桥串联形成的连桥组实现了梭梭水分横向快速运输,形成了适应干旱环境独特的水分运输系统。利用重建的生长轮三维纹理影像,通过纵向观察,观察者可以清晰的区分连桥结构和生长轮层。研究结果有利于梭梭生长轮的计数,有利于梭梭种群年龄结构的调查,也为在生理生态水平、分子水平揭示梭梭生长规律提供了新的研究思路。

关键词:梭梭;生长轮;连桥结构;横向运输;三维模型

Extraction and analysis of growth ring texture characteristics of *Haloxylon ammodendron*

WANG Xinghao¹, HAN Zhongling², LIU Zhigang⁴, CHENG Yongxiang^{1,*}, DONG Hegan¹, WU Ling¹, HUANG Jingfeng³

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

4 Chongqing Zhence Science and Technology Company with Limited Liability, Chongqing 400030, China

Abstract: To have a better understanding of the special texture structure of stem transverse section of *Haloxylon ammodendron*, based on the CT scan image, the three-dimensional image of the growth ring was reconstructed by extracting the outside envelope of the rapid growth band, and formative cause of the two-dimensional texture characteristics was revealed from the three-dimensional texture characteristics. It is found that there was a direct connection between the rapid growth band of *Haloxylon ammodendron*, that was, there was the transverse conjunction between the vessels of each growth ring layer. In this study, the spanning structure between adjacent growth ring vessels was named as the connecting bridge

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:2024-12-19; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengyongxiang_613@163.com

structure, which is an efficient channel for the transverse transport of water. The secondary xylem of *Haloxylon ammodendron* lacks wood rays, and its water transverse transport function was completed by a transverse transport system composed of the connecting bridge structure. The connecting bridge structure was also responsible for the intermittent spiral of the cross-sectional texture in secondary xylem of *Haloxylon ammodendron*. The connecting bridge structure was divided into two basic interlayer spanning modes: transverse one and longitudinal one. The average value of the approximately elliptical discontinuous opening caused by the transverse connecting bridge in the rapid growth ring was 0.51 mm^2 , and the average value of the discontinuous opening caused by the longitudinal connecting bridge was 0.17 mm^2 . On average, 6—7 connecting bridge structures were connected in series to form a bridge group and distributed radially in the secondary xylem of *Haloxylon ammodendron*, most of the bridge group were inclined upwards, while a few were inclined downwards, and the tilt angle was between ± 13.2 — 17.46° . The bridge group formed by the connecting bridges in series realizes fast transverse transport of water in secondary xylem of *Haloxylon ammodendron*, played the function of wood rays in the secondary xylem of other plants, and formed a unique water transportation system adapted to the arid environment. Using the reconstructed 3D texture image of the growth ring, the observer can clearly distinguish between the bridging structure and the growth ring layer through longitudinal observation. The results of this study have far-reaching implications. Firstly, it was conducive to the counting of growth rings. Secondly, it was beneficial to investigate the age structure of the population of *Haloxylon ammodendron*. Thirdly, it also provided new research interests for revealing the growth law of *Haloxylon ammodendron* at the physiological, ecological and molecular levels.

Key Words: *Haloxylon ammodendron*; growth ring; connecting bridge structure; transverse transportation; 3D model

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)是苋科、梭梭属的灌木或小乔木,树皮灰白色,木材坚脆;花期五至七月,果期九至十月,有花后生殖休眠现象^[1],其同化枝有花环结构,属于 C4 植物^[2]。在水分利用上,梭梭既能利用地表水也能利用浅层地下水^[3]。梭梭作为亚洲荒漠区分布最广泛的物种,是温带荒漠重要的固沙植物,也是“沙漠人参”肉苁蓉的主要寄主^[4]。梭梭在维护亚洲荒漠生态平衡上起着其他树种不可比拟的作用^[5]。

梭梭次生木质部横切面纹理解构特殊,其生长轮呈断续的螺旋线^[6],且每年可以形成数轮。李钢铁等人^[7]报道的梭梭年均生长轮数为 5.3 轮,王伟等人^[8]报道为 1.375 轮,宋于杨等人^[9]报道为 3.9 至 5.4 轮。研究认为梭梭每年形成的轮数均不相同,且同一树盘不同方向轮数也具有很大差别^[10]。由于梭梭特殊的径向生长方式及纹理结构,使得生长轮计数困难,所计轮数也不能直接表征年龄。在梭梭种群年龄结构调查中,如何通过标准木,利用梭梭扫描图像准确计数生长轮数仍然是一个需要解决的问题。为获取梭梭年龄,目前主要的研究方法是基于已知年龄的梭梭,通过茎杆的横截面进行生长轮计数,获取年均生长轮数,利用直接计数或估算的生长轮数除以年均生长轮数获取梭梭的年龄^[7-8],或测量基径、株高、冠幅指标,构建年龄估算模型^[9, 11],或基于基径^[12-15]、株高指标^[16]制定龄级划分标准用于梭梭种群年龄结构调查。同位素测定法也被应用于测定梭梭的年龄^[17],但目前仅限于探索性研究。因此,深入研究梭梭纹理特征,探究纹理形成机理很有必要。

目前,学者已从不同水平围绕梭梭纹理结构开展了研究。在解剖水平,周朝彬等人^[18]研究发现白梭梭树轮生长带由深棕色带和浅棕色带组成,其中深棕色生长带主要由纤维、射线和导管构成。浅棕色带主要由轴向薄壁组织和导管构成。木射线是几乎所有树木都具有的重要径向组织,为树木的径向及侧向运输提供保障^[19]。Heklau 等人^[20]认为苋科的大部分物种包括梭梭的木质部为无射线结构。周朝彬等人^[21]研究表明,梭梭具有木射线,由于梭梭木射线组织比量(仅 3.69%—7.06%)远低于大多数被子植物射线比量(10%—20%),因此,在切片量较少时,就不容易从弦切面观察到木射线组织。那么在干旱缺水的环境下梭梭是如何有效完成水分横向运输的,这是一个值得深入研究的问题。

在生理生化和分子水平,学者围绕梭梭生长与环境响应展开了大量研究。发现在干旱胁迫下,梭梭通过提高渗透调节物质的含量来维持细胞膨压,通过增加抗氧化酶活性减轻干旱对细胞膜的损伤^[22-24]。李建贵等人^[25]通过连续观测,研究了梭梭内源激素的季节变化,发现赤霉素含量在整个生长季表现为波浪式下降,

生长素含量表现为整体下降。另有相关研究证明生长素对维管组织的分化具有重要作用,并参与木质部管状分子的形成^[26]。赤霉素对次生壁中纤维素的合成发挥重要作用^[27]。吕昕培^[28]发现渗透胁迫显著诱导了梭梭木质素合成途径相关基因的表达,使得梭梭植株体内木质素的含量显著增加,提高了木质部机械强度。何江峰等人^[29]探明了梭梭应对干旱胁迫和水分刺激的分子调控机理,表明 AP2-EREBP、MYB、bHLH、NAC、WRKY 和 ABI3VP1 等转录因子对梭梭干旱胁迫和水分刺激应答调控作用显著。近年来对于模式植物拟南芥的研究,使研究者对植物次生细胞壁生物合成的调控网络逐渐清晰,明确了 NAC 和 MYB 类转录因子在木质部导管、纤维细胞次生细胞壁加厚等过程中的核心作用,以及其它转录因子在此过程中的调控作用,并解析了这些调控因子之间的层级关系^[30]。以上研究成果为深入理解环境变化对梭梭生长的影响,及揭示次生木质部深棕色和浅棕色带相间排列纹理的形成机理奠定了坚实基础。

综上所述,研究选择从梭梭茎杆 CT 扫描入手、基于图像处理和 3D 建模技术,通过梭梭生长轮纹理特征提取、三维信息重构、升尺度、摆脱二维图像束缚,从三维和整体上探索梭梭生长轮生长规律,揭示纹理背后的奥秘,为梭梭年龄定年提供帮助,并为今后在生理生态水平、分子水平揭示梭梭生长规律提供新的研究思路。

1 研究区和数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于新疆石河子市 147 团,玛纳斯河灌区、莫索湾总干渠西侧,古尔班通古特沙漠南缘绿洲荒漠交错带上(图 1),地理范围(86°13′33″—86°14′42″E,44°40′30″—44°42′46″N)。该地属于典型的干旱内陆气候,年平均气温 4—9℃,年降水量小于 212 mm,年蒸发量大于 2000 mm,海拔高度 296 m。土壤类型属于漠土和盐碱土。植被型属于荒漠,主要代表性植物为梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)。

1.2 数据来源

研究首次采样时间为 2023 年 11 月,采样点位于该区自然植被覆盖区(表 1),土壤类型为漠土,植物群落为梭梭群系。截取该点梭梭一段 50 cm 茎杆带回实验室。在实验室用 10 cm 金属管箍套住茎杆,利用手工锯,沿套管边缘锯开,并打磨平整。获得两端截齐、高 10 cm,直径为 18.6 mm 待测样品。将样本放置在 80℃烘箱,烘干 24 h 后进行 CT 扫描,获得数据用于研究方法的探索。

表 1 梭梭采样及 CT 扫描信息表

Table 1 Sampling and CT scan information table of *Haloxylon ammodendron*

样本编号 Specimen number	坐标 Coordinate	株高/m Plant height	冠幅/m ² Crown breadth	直径或茎径/mm Stem or stem base diameter	扫描体素/μm ³ Scan voxel
样本 Specimen 0	86°14′5.68″E, 44°42′13.41″N	2.08	4.73	18.6	15.87873
样本 Specimen 1	86°14′12.45″E, 44°41′17.80″N	0.8	0.19	18.02	13.30660
样本 Specimen 2	86°14′12.20″E, 44°41′17.86″N	0.85	0.38	23.67	14.95690
样本 Specimen 3	86°14′11.47″E, 44°41′17.97″N	1.16	1.34	25.55	15.79030
样本 Specimen 4	86°14′10.98″E, 44°41′18.05″N	0.89	0.31	23.54	15.78460
样本 Specimen 5	86°14′11.35″E, 44°41′17.99″N	0.91	0.97	24.3	15.78460

研究第二次采样时间为 2024 年 5 月,采样地点是该区梭梭和棉花套种的农田(表 1),土壤类型为盐碱土。该地块最早为新疆生产建设兵团农八师 147 团开垦的农田,后因土壤盐渍化问题严重而撂荒。研究通过实地走访土地承包人,获知了地块中梭梭详细的种植历史。该地于 2018 年 4 月购买 2017 年播种的一年生实生苗,进行了单穴单株种植,因当年部分区域成活率低于 60%,在 2019 年春季再次购买 2018 年播种的一年生实生苗,进行了补种。因此,截至采样时间,样地中梭梭的年龄为 6—7 年。为进一步验证走访调查梭梭种植历史信息的准确性,研究获取了该地块 2014、2017、2019—2021、2023 和 2024 年的高空间分辨率遥感影像(<https://www.earthol.com>)。所获数据中虽缺少了 2018 年卫星影像,但通过 2017 年和 2019 年前后的地表纹理状况,可以明确 2017 年以前该地为撂荒农田,2019 年至今因梭梭的种植地块地面纹理结构未发生明显变

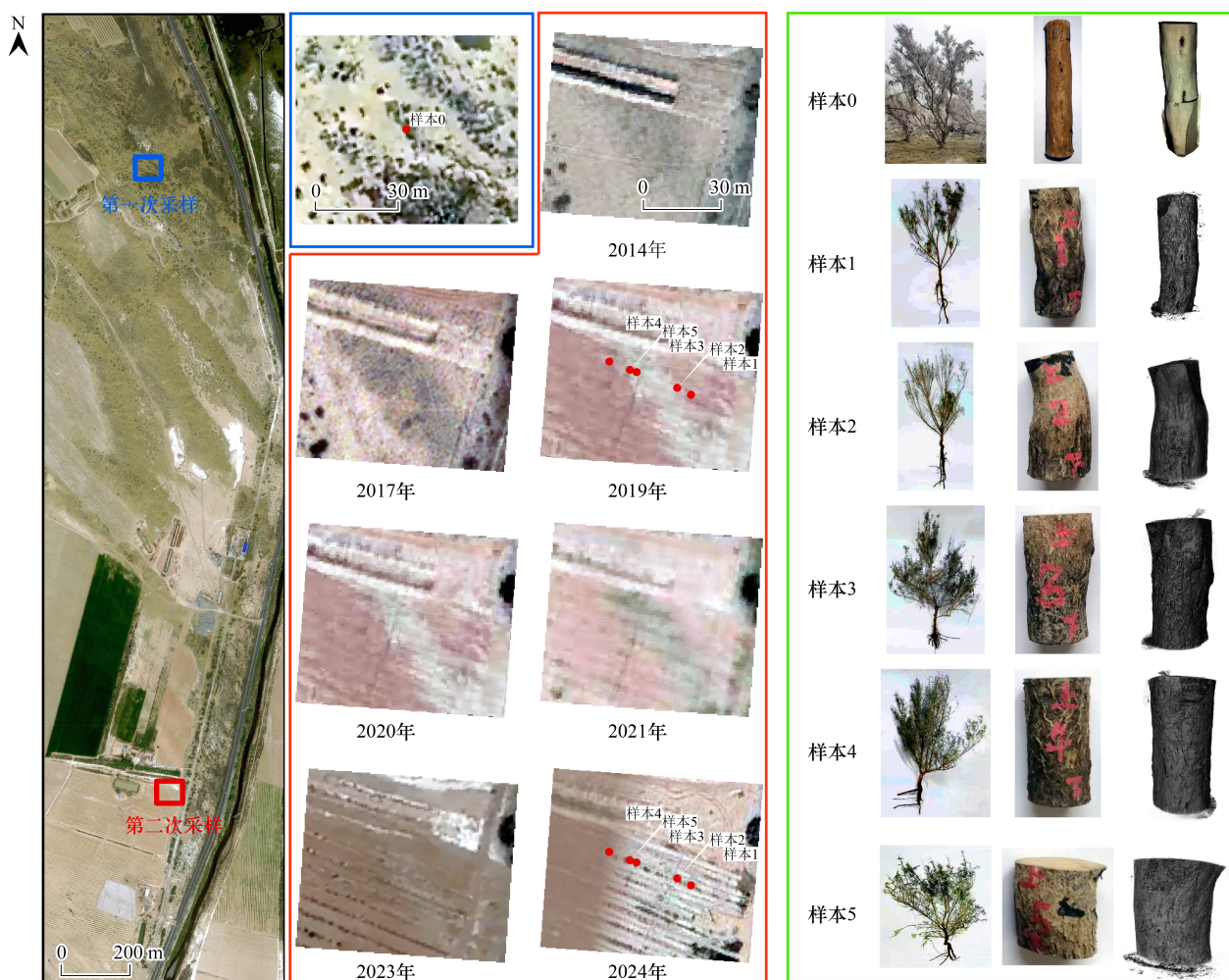


图1 研究区及数据来源图解

Fig.1 The illustration of the study area and data sources

化。研究在该样地共采集 5 株梭梭样本(表 1),将样本带回实验室,利用宽为 5 cm 的台钳夹住样本根茎过渡区的主杆位置,两端截齐,并打磨平整,将样品烘干水分后进行 CT 扫描,所获数据用于后续结果分析。

2 研究方法

研究从样本 1—5 号 CT 扫描横切图中,各选取 500 幅连续图像用于生长轮纹理分析。利用 Photoshop (PS) 软件导入图片,通过反向、色阶调整使 CT 原始扫描影像中黑色部分(植物组织密度低、生长速度快的部分)变为白色。在软件滤镜库中选择影印滤镜,设置影印滤镜参数(细节值为 24;暗度为 50),导出图片。继续利用 Photoshop 软件打开上一步导出的图片,在滤镜(风格化)中选择浮雕效果,设置浮雕效果参数为:高度 2 像素,数量为 100%,角度以 18° 为起始,每次增加 18° 直至 360° ,即每张影印图片以 18° 为间隔共导出 20 个角度的浮雕效果图片。研究将每一角度浮雕效果图都单独保存在一个文件夹中。

在 GIS 中为每个样本单独绘制一个掩膜,该图以 9° 为起始边,每次增加 18° ,全图共有 20 个区域,并为每个区域单独赋值,数值范围为 1—20,导出栅格掩膜图,确保该图与浮雕图在图像大小和分辨率上相同。利用 ENVI+IDL 通过批处理,获取掩膜中每个区域对应的相应浮雕角度图像中像素灰度值大于 127 的像元,将 20 个方向结果图逐幅进行拼接,获取格式为 TIF 的梭梭快速生长带外包络线图像。

按照每个样本 CT 扫描时的体素(表 1),将获取的包络线图导入 Avizo 3D 软件,导入成功后添加指令 Interactive Thresholding,将该指令的 Intensity Range 栏设置范围为 1—1。随后添加指令 Remove Small Spots 指

令,设置 Size 栏为 10000,此步可筛选掉图像中绝大多数杂点,减少杂点对观察带来的影响。随后添加 Volume Rendering Settings 和 ROI BOX for Volume Rendering 指令,即可得到方便观察的梭梭快速生长轮外包络线三维影像(图 2),结果用于后续分析。另外,研究利用 Sketchup 软件绘制了部分三维模拟模型,以辅助结果分析。

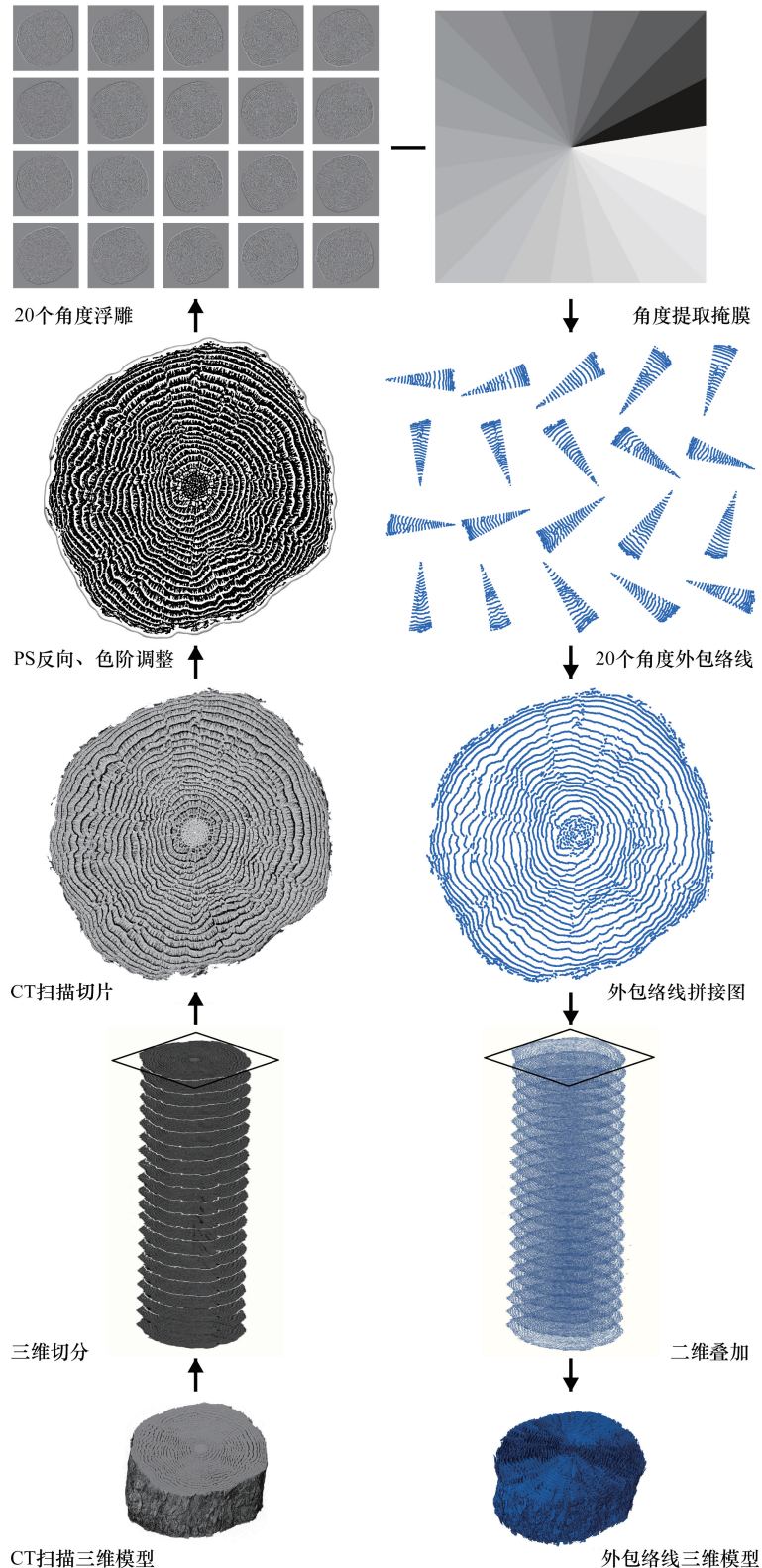


图 2 基于 CT 扫描图像的梭梭生长轮纹理三维重建流程图

Fig.2 Based on CT scan images, 3D reconstruction flowchart of the growth ring textures of *Haloxylon ammodendron*

3 结果与分析

3.1 梭梭平板和 CT 扫描生长轮纹理特征的对比分析

研究选择两幅扫描位置基本一致的平板和 CT 图像进行纹理特征的对比分析。从图 3 可以看出,梭梭平板扫描图中深棕色带结构致密为慢速生长轮,相关研究表明该区主要由木纤维等机械组织构成。浅棕色带结构疏松为快速生长轮,相关研究表明该区主要由导管等输导组织构成^[18]。CT 扫描图中灰白色带中组织密度高,为慢速生长轮。灰黑色带中组织密度低,为快速生长轮。一个慢速生长轮向外连接一个快速生长轮组成一个完整的生长轮。快速生长轮中外包络线(慢速生长轮的内包络线)平滑度高,适合用于梭梭生长轮纹理特征分析。感兴趣区 1 中,生长包络线出现不连续间断错位现象,感兴趣区 2 中,生长包络线出现两轮变三轮的加一轮现象,这两种典型轮纹在梭梭茎杆横切面上普遍存在。另外,梭梭茎杆横切面上生长轮纹理呈现螺旋状。

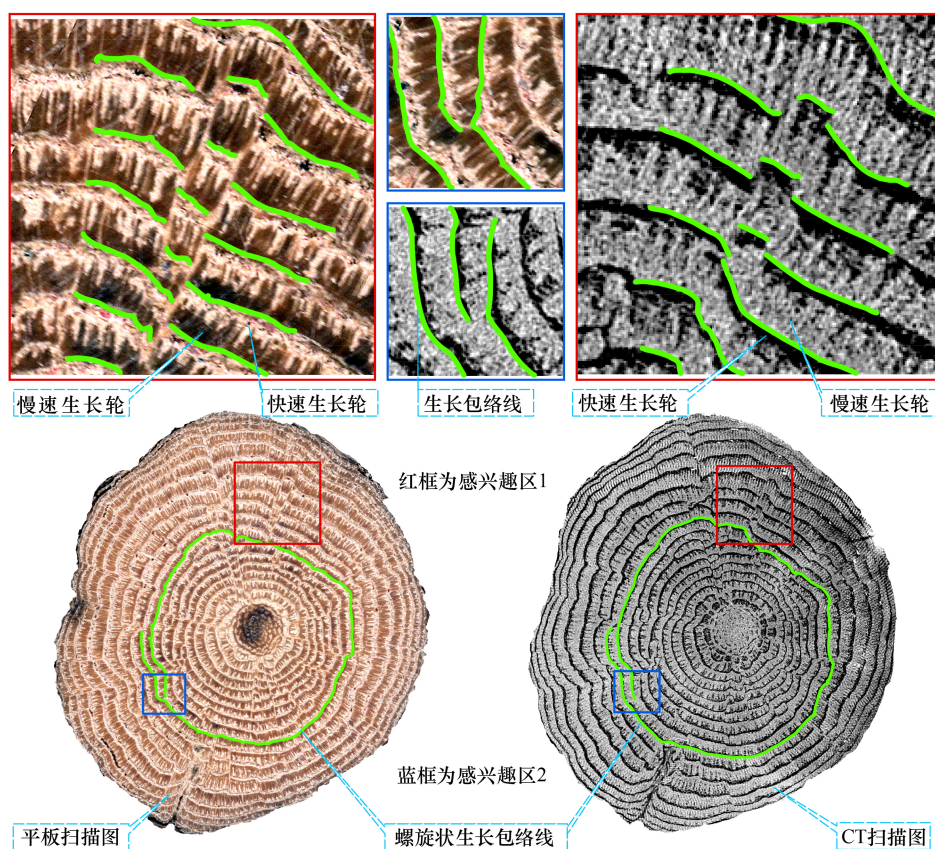


图 3 平板和 CT 扫描图像生长轮纹理的对应关系图解

Fig.3 Relationship diagram of the correspondence between growth ring textures in flat plate and CT scan images

3.2 梭梭生长轮连桥结构的发现与测量

研究利用由包络线重建的梭梭茎杆三维解剖图,对其生长轮纹理特征展开了由平面到三维的立体研究(图 4)。发现快速生长轮之间存在着直接连接,即各轮层导管间存在横向连通。研究将相邻生长轮导管之间的跨连结构命名为连桥结构。该结构是梭梭实现水分横向运输的高效通道。连桥的连接方式主要分为纵向和横向两种基本模式。当然也有一些连桥连接方式介于这两者之间,也存在一些更为复杂的连接方式,如在开始为横向连接连桥向外连接几轮后转变为纵向连接连桥,或大的连桥结构上包含另一种小的连桥结构。连桥结构在快速生长轮层造成的开口被慢速生长轮层中由木纤维等所构成的机械组织所穿过(图 5)。进一

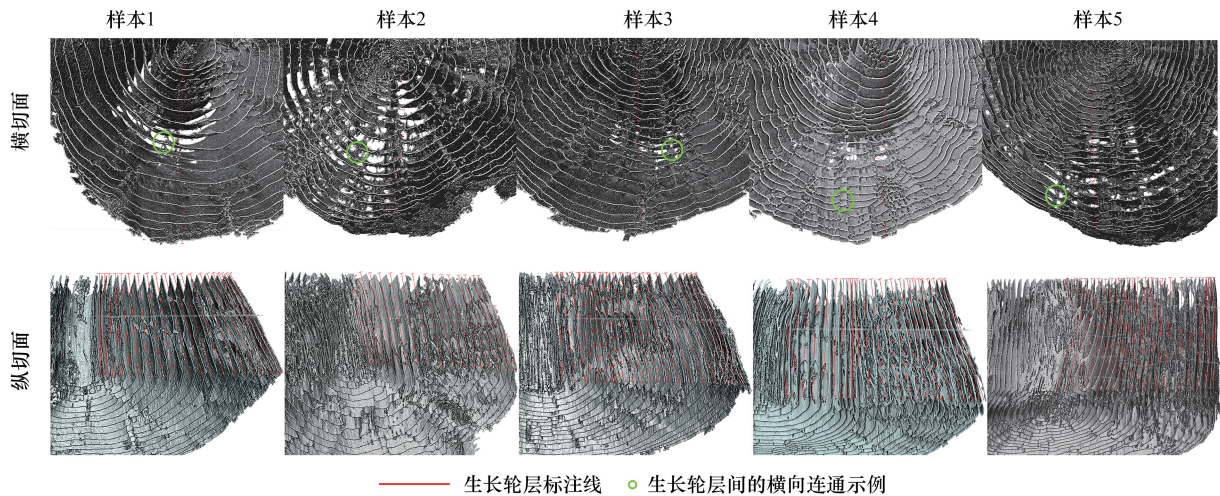


图 4 基于包络线重建的梭梭茎杆三维解剖图

Fig.4 Based on envelope reconstruction, 3D anatomical diagrams of *Haloxylon ammodendron* stem

步观察发现连桥结构通常多个为一组串联连接,并形成连桥组(图 6)。研究从样本 1—5 中随机选择纵向和横向连接连桥所组成的连桥组各 30 组进行观测,以下简称纵向连桥组和横向连桥组。连桥及连桥组命名方式见图 7 三维模型模拟图。

对选定的纵向连桥组,每个连桥组包含的连桥数为 4—13 个不等,平均为 (6.32 ± 2.38) 个。连桥组长度为 $956.35—4697.81 \mu\text{m}$ 之间,平均为 $(1982.90 \pm 909.69) \mu\text{m}$ 。连桥组 73% 呈向上倾斜,27% 向下倾斜。连桥组整体倾角度的绝对值为 $0.00—27.71^\circ$ 之间,平均为 $(13.20 \pm 6.23)^\circ$ 。连桥组中由纵向向上连接连桥所组成的连桥组占比 40%,由纵向向下连接连桥所组成的连桥组占比 60%。在 30 个纵向连桥组所统计的共 196 个连桥结构中,连桥在快速生长轮造成的近椭圆形不连续开口(图 8)的短轴长度在 $52.56—1368.21 \mu\text{m}$ 之间,平均为 $(277.81 \pm 177.26) \mu\text{m}$ 。长轴长度在 $151.69—3334.77 \mu\text{m}$ 之间,平均为 $(692.53 \pm 347.69) \mu\text{m}$ 。开口面积为 $0.01—1.53 \text{ mm}^2$,平均为 $(0.17 \pm 0.19) \text{ mm}^2$ 。

对选定的横向连桥组,每个连桥组包含的连桥数为 3—11 个不等,平均为 (6.52 ± 2.20) 个。连桥组长度为 $915.31—4221.26 \mu\text{m}$ 之间,平均为 $(2218.86 \pm 767.21) \mu\text{m}$ 。连桥组 80% 呈向上倾斜,20% 向下倾斜。连桥组整体倾角度的绝对值为 $1.52—38.04^\circ$ 之间,平均为 $(17.30 \pm 10.73)^\circ$ 。连桥组中由横向向左连接连桥所组成的连桥组占比 53.3%,由横向向右连接连桥所组成的连桥组占比 46.7%。在 30 个横向连桥组所统计的共 190 个连桥结构中,连桥在快速生长轮造成的近椭圆形不连续开口的短轴长度在 $94.34—827.68 \mu\text{m}$ 之间(图 8),平均为 $(340.03 \pm 136.42) \mu\text{m}$ 。长轴长度在 $384.41—5158.68 \mu\text{m}$ 之间,平均为 $(1813.78 \pm 809.67) \mu\text{m}$ 。开口面积为 $0.03—1.87 \text{ mm}^2$,平均为 $(0.51 \pm 0.33) \text{ mm}^2$ 。

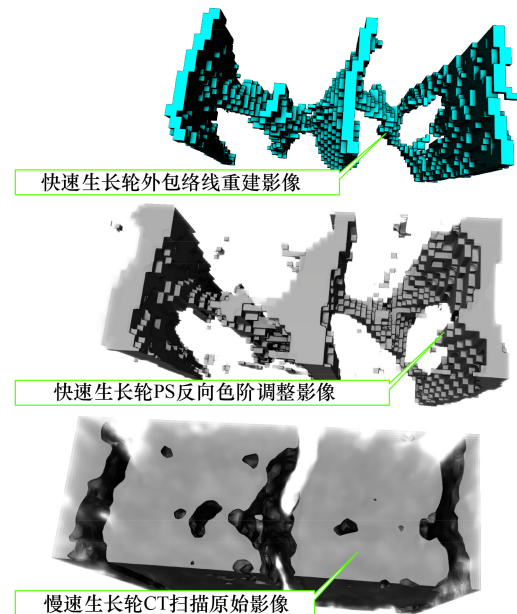


图 5 包络线、快速和慢速生长轮三者连桥结构发生处的空间关系图

Fig.5 The spatial relationship diagram of the envelope, fast and slow growth rings at the location of connecting bridge structure

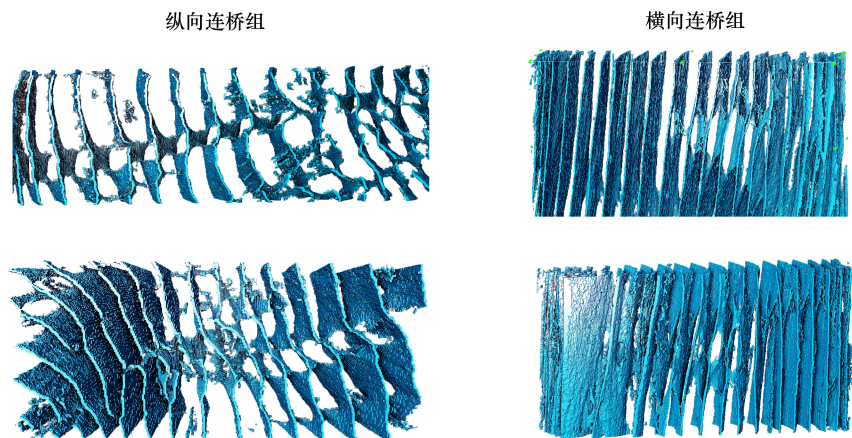


图6 连桥组结构示意图

Fig.6 The diagram of connecting bridge structure groups

两类连桥组中包含的连桥平均数量大致相等。连桥组多数呈向上倾斜,少数向下倾斜。随着梭梭的生长,连桥组由树心向外呈辐射状散布在梭梭次生木质部中。这些快速生长层层间横向通道和层中纵向通道一起构成了梭梭高效的物质运输系统,也正是这种输水、储水能力强的多分布、长距离、大型输导结构才足以满足梭梭的水分运输需求,使其能够更好适应干旱缺水的环境和高效利用偶然脉冲式的降水。

3.3 梭梭生长轮生长特征分析

通过上述对梭梭平面和立体生长轮纹理的分析,研究可以对梭梭茎杆横切面平板扫描图呈现的特殊纹理结构进行深度解构。图3左上红框感兴趣区1中是横切到了4个纵向连接连桥,而图3右上红框感兴趣区1中生长包络线出现不连续间断错位现象则是横切到了3个纵向连接连桥。图3绿框感兴趣区2中生长包络线出现两轮变三轮的加一轮现象是横切到了两个连续的横向连接连桥。横向连桥结构也是造成梭梭生长轮横切面纹理呈现螺旋状不能闭合的直接原因。研究利用梭梭生长轮纹理结构,通过三维建模,模拟了一个梭梭生长轮模型,再现出梭梭茎杆横切面中这些特殊的纹理结构(图9),证明研究对梭梭纹理特征的认识正确。

连桥结构的存在虽干扰了横切扫描图对梭梭生长轮数量的识别,但在外包络线重构的三维立体图中,除树心位置外(因为该位置是许多连桥结构的起始位置,这就会造成快速生长轮破损较为严重,纵向识别存在一定的难度)通过纵向观察,梭梭生长轮数量清晰可辨(图4)。研究对样本1—5上、下、左、右(90°、270°、180°、0°)四个方向上的轮层数和轮宽进行了计数和测量(表2),从结果可知,该样地梭梭每年形成的生长轮数平均为3.00—3.43轮,符合生境一致,轮层数基本一致的假设。从各组由树皮向树心测量的轮宽序列相关性分析中发现(图10),同一样本及不同样本在某些方向的测量结果间均具有较高相关性。从图11可知样本1、2和4生长规律基本相同,样本3和5生长规律基本相同。结合图1中历年卫星数据和采样位置记录分析

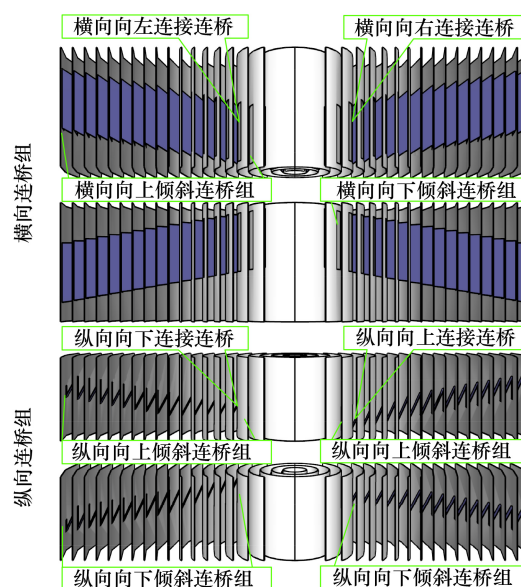


图7 连桥及连桥组命名图解

Fig.7 Naming diagram of connecting bridge structure and connecting bridge structure groups

发现,样本 3 和 5 紧邻,且同处于一条较重的盐碱带上。样本 1、2、4 土壤盐渍化程度相对较轻,生长轮的生长规律也近乎相同。研究结果表明梭梭在生长环境相同的情况下,其生长轮的生长规律也近乎相同,即梭梭生长轮虽然不能直接用来计年,但却可以用来记录小环境的环境变化。

4 讨论

梭梭生长轮数是用于计算梭梭年龄的重要指标。同以往基于茎杆横切面图像的梭梭生长轮研究相比,研究通过生长轮包络线三维重建,获取了更直观的立体信息,简化了 CT 原始三维影像,使梭梭纹理特征更易于被观察和分析。实践中可如图 4 所示,利用 Avizo 等软件的测量工具,确定最大半径的方向,在该方向做纵切剖面,通过对该剖面的观察,可容易区分出连桥结构和

生长轮层,利用绘制工具标注出生长轮层的界限,对绘制结果,结合横切面观察,进一步检查划分是否正确。基于标注线可实现梭梭生长轮层的准确计数。研究中若仅凭横截面图像进行计数,由于连桥结构的干扰容易造成计数错误。以图 9 构建的已知 20 轮模型来说,某些方向计数的轮数存在加轮和减轮现象。连桥结构除了影响轮层计数的准确,关键是破坏了测量数据的连续性,使据此测量的轮宽数据失去可用性。因此,应用中可基于重构的三维影像,通过纵向观测,避开连桥结构,选择连续性好的区域测量轮宽,所测数据准确性高。与温带大多数树木形成的年轮不同,梭梭每年可以形成多个生长轮,研究所得结果 3.00—3.43 轮也支持梭梭每年形成多个生长轮的结论。梭梭是否能够利用偶然丰富的水分进行脉冲式生长尚有待于深入研究。由于梭梭一年多轮现象,因此,生长轮计数不能直接用于确定梭梭年龄,但却可以辅助该问题的解决。应用中可依据李钢铁等人^[7]或王伟等人^[8]构建的方法,按生境划分研究区,选择已知年龄的标准木,按本研究计数方法,计算出梭梭年均生长轮数。利用直接计数或基径、株高、冠幅等指标通过回归方程估算的生长轮数除以年均生长轮数,获得未知梭梭的年龄。

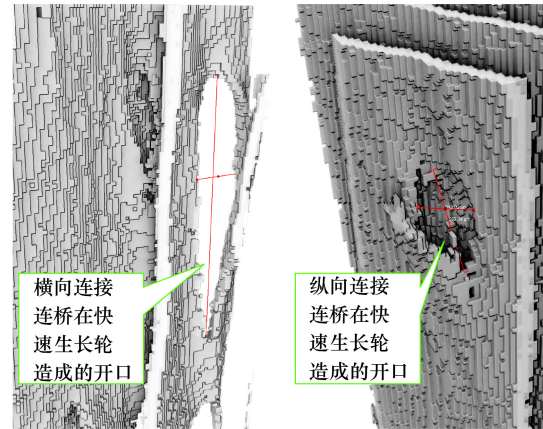


图 8 连桥在快速生长轮造成的开口示意图

Fig.8 The diagram of the opening created by connecting bridge structure in the rapid growth ring

表 2 梭梭样本生长轮数统计表

Table 2 Statistical table of the number of growth rings for *Haloxylon ammodendron* specimens

样本编号 Specimen number	上 Up	下 Down	左 Left	右 Right	估计年龄/a Estimated age	年平均生长轮数 Annual average number of growth ring
样本 Specimen 1	20	18	19	20	6	3.33
样本 Specimen 2	16	20	18	17	6	3.33
样本 Specimen 3	21	21	20	20	7	3.00
样本 Specimen 4	24	20	21	24	7	3.43
样本 Specimen 5	24	21	22	22	7	3.43

木射线是几乎所有树木具备的一种重要的径向组织,在水分、营养物质和非结构性碳水化合物的贮存和运输中起重要作用,调节着木质部水力和树木生长^[19]。木射线是位于形成层以内次生木质部中的维管射线,在木材中起横向输导和贮藏养分的作用。本研究通过对梭梭茎杆三维影像观察,未发现梭梭具有木射线,结果支持 Heklau 等人^[20]的研究结果,认为梭梭无木射线。连桥结构形成的横向运输系统代替了其他树木由木射线构成的横向运输系统,使梭梭形成了以导管为基础的纵横高效运输网络,该网络结构能够使其更好的适应干旱缺水的生长环境,实现水分的高效运输。限于扫描精度的影响,研究未能对局部区域进行更为精细的

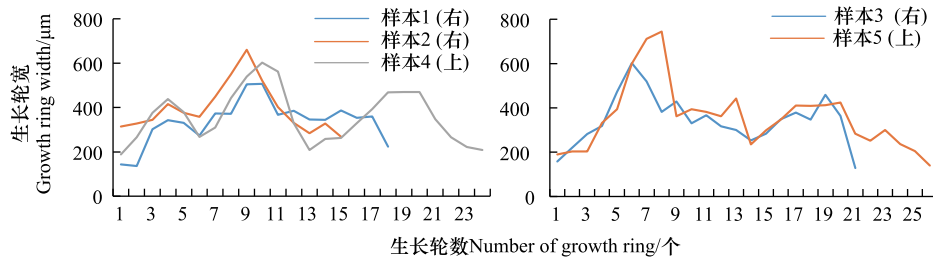


图 11 样本间个别方向生长轮宽折线图

Fig.11 The line charts of individual direction growth ring width between samples

素和生长素)等。依据茎杆生长测量仪监测的结果,分别采集快速和慢速生长期梭梭茎杆样本,进行 RNA-seq 转录组测序^[35-36],对比分析两个时期差异表达的基因,重点关注 NCA 一级和 MYB 二级转录开关不同成员所起的作用。未来如果能够将上述信息相综合,一定有望揭示出梭梭在一个生长季连续多次由木纤维生长为主转向导管生长为主的外在环境激活阈值和内在分子调控机理。

5 结论

梭梭每年能形成多个生长轮。连桥结构使梭梭生长轮纹理在横截面上表现为断续的螺旋线,干扰了梭梭生长轮的计数。通过对梭梭快速生长轮外包络线三维重建模型的纵向观察可以极大减少连桥结构对生长轮数识别的干扰。连桥结构分为纵向连接和横向连接两种基本模式,其中横向连接的连桥在快速生长轮造成的平均开口为 0.51 mm^2 ,纵向连接的连桥造成的平均开口为 0.17 mm^2 ,这些开口被慢速生长轮层中木纤维等所构成的机械组织所穿过。平均 6—7 个连桥组成一个连桥组,成辐射状分布于梭梭茎杆中,连桥组多数为向上倾斜,少数向下倾斜,倾斜角度为 $\pm 13.2\text{—}17.46^\circ$ 之间。相比于直接利用 CT 扫描原始影像,研究构建的梭梭纹理信息提取方法更有利于其生长轮问题的研究。梭梭通过串联多个连桥结构并辐射分布的方式实现了水分横向快速运输,形成了适应干旱环境独特的水分运输系统。

参考文献 (References):

- [1] 俞圆. 荒漠植物梭梭对地表高温胁迫的响应及“花后生殖休眠”现象的研究[D]. 南京:南京林业大学, 2012.
- [2] 苏培玺, 安黎哲, 马瑞君, 刘新民. 荒漠植物梭梭和沙拐枣的花环结构及 C₄ 光合特征. 植物生态学报, 2005, 29(1): 1-7.
- [3] 李宁, 周海, 任珩, 种培芳, 陈国鹏. 不同地下水位处梭梭(*Haloxylon ammodendron*)水分来源特征. 中国沙漠, 2021, 41(4): 79-86.
- [4] 谭德远, 郭泉水, 王春玲, 马超. 寄生植物肉苁蓉对寄主梭梭生长及生物量的影响研究. 林业科学研究, 2004, (4): 472-478.
- [5] 贾志清, 卢琦, 郭保贵, 赵明, 梁远强. 沙生植物--梭梭研究进展. 林业科学研究, 2004, 17(1): 125-132.
- [6] 里昂节夫. 卡拉库姆沙漠的梭梭林. 郑世锴, 译. 北京: 科学出版社, 1960: 16-29.
- [7] 李钢铁, 史晴, 任改莲, 邹受益. 确定梭梭年龄的初步探讨. 内蒙古林学院学报, 1995, 17(2): 52-55.
- [8] 王伟, 梁存柱, 朱宗元, 刘钟龄, 张丽芳. 梭梭年轮测定方法及生长动态的研究. 干旱区资源与环境, 2001, 15(2): 67-75.
- [9] 宋于洋, 楚光明, 胡晓静. 古尔班通古特沙漠梭梭年龄估算模型评价. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 166-170.
- [10] 肖生春, 肖洪浪, 彭小梅. 梭梭(*Haloxylon ammodendron*)不宜用于树木年轮学研究. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1692-1698.
- [11] 宋于洋, 楚光明, 胡晓静. 古尔班通古特沙漠梭梭种群径级与龄级关系的研究. 西北植物学报, 2011, 31(4): 808-814.
- [12] 赵鹏, 徐先英, 张裕年, 段晓峰, 邱晓娜, 张雯, 张俊年. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群年龄结构及动态. 生态学报, 2023, 43(14): 6069-6079.
- [13] 宋于洋, 刘长青, 赵自玉. 石河子地区不同生境梭梭种群数量动态分析. 西北植物学报, 2008, 28(10): 2118-2124.
- [14] 毛毛, 蒙仲举, 党晓宏, 赵飞燕. 巴丹吉林沙漠东缘天然梭梭种群结构与动态特征. 干旱区研究, 2023, 40(6): 971-978.
- [15] 吕朝燕, 张希明, 刘国军, 吴俊侠, 闫海龙, 邓潮洲. 准噶尔盆地西北缘梭梭种群结构和空间格局特征. 中国沙漠, 2012, 32(2): 380-387.
- [16] 黄培祐, 李启剑, 袁勤芬. 准噶尔盆地南缘梭梭群落对气候变化的响应. 生态学报, 2008, 28(12): 6051-6059.
- [17] Li J F, Wada H, Matsuzaki H. Radial growth rate through successive cambia in *Haloxylon Ammodendron* (Chenopodiaceae) from the Gurbantinggüt Desert, Northwestern China, determined by a series of radiocarbon dating. Geochemical Journal, 2015, 49(1): 39-51.

- [18] 周朝彬, 张世龙, 宋于洋. 古尔班通古特沙漠沙垄不同部位白梭梭树轮组织比量特征. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 116-121.
- [19] 郭娟, 尹丽娟, 马灵玉, 姜笑梅, 孟秋露, 姚利宏. 木射线结构特征与分析方法的研究进展. 林业工程学报, 2024, 1-14.
- [20] Heklau H, Gasson P, Schweingruber F, Baas P. Wood anatomy of Chenopodiaceae (Amaranthaceae s.l.). IAWA Journal, 2012, 33(2): 205-232.
- [21] 周朝彬, 王梦瑶, 龚伟. 梭梭射线组织特征与非结构性碳水化合物含量的关系. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1105-1110.
- [22] 王喜勇, 王成云, 魏岩. 梭梭属植物渗透调节物质的季节性变化. 安徽农业科学, 2014, 42(5): 1427-1428, 1434.
- [23] 汪媛艳, 柴成武, 纪永福, 王方琳, 赵鹏, 付贵全, 唐卫东, 肖斌. 干旱胁迫对荒漠植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*) 幼苗保护酶活性和渗透调节物质的影响. 草业科学, 2024, 42(2): 288-294.
- [24] Arabzadeh N. The effect of drought stress on soluble carbohydrates (sugars) in two species of *Haloxylon persicum* and *Haloxylon aphyllum*. Asian Journal of Plant Sciences, 2012, 11(1): 44-51.
- [25] 李建贵, 黄俊华, 王强, 阮晓. 梭梭叶内激素与渗透调节物质对高温胁迫的响应. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, (6): 45-48.
- [26] Serivichyaswat P T, Kareem A, Feng M, Melnyk C W. Auxin signaling in the cambium promotes tissue adhesion and vascular formation during *Arabidopsis* graft healing. Plant Physiology, 2024, 196(2): 754-762.
- [27] Yang Q, Tang J G, Huang X Y, Huang K F. The effect of exogenous gibberellin and its synthesis inhibitor treatments for morphological and physiological characteristics of Tartary buckwheat. Scientific Reports, 2024, 14(1): 20117.
- [28] 吕昕培. 梭梭木质素合成对盐和渗透胁迫的响应及 HaLAC15 和 HaCOMT 的功能鉴定[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [29] 何江峰, 王力伟, 房永雨, 王蕴华, 王朝, 刘红葵, 内蒙古自治区农牧业科学院生物技术研究中心. 干旱胁迫和复水处理后梭梭转录因子的转录组分析. 华北农学报, 2020, 35(1): 36-43.
- [30] 张雨, 赵明洁, 张蔚. 植物次生细胞壁生物合成的转录调控网络. 植物学报, 2020, 55(3): 351-368.
- [31] Ma L Y, Meng Q L, Jiang X M, Ge Z D, Cao Z X, Wei Y P, Jiao L C, Yin Y F, Guo J. Spatial organization and connectivity of wood rays in *Pinus massoniana* xylem based on high-resolution μ CT-assisted network analysis. Planta, 2023, 258(2): 28.
- [32] 王潇曼, 王泽, 任财, 郑晗晗, 师雅鑫, 吴明哲, 唐玲, 李姝琦. 生境土壤水分变化下梭梭幼苗的生长特征. 湖北农业科学, 2024, 63(9): 42-46.
- [33] 韩雨晴, 熊伟, 吴波, 卢琦, 杨文斌, 刘雅莉, 张景波, 辛智鸣, 马迎宾, 廉泓林, 王思涵. 乌兰布和沙漠梭梭茎干液流对降雨脉冲的响应. 植物生态学报, 2024, 48(9): 1-8.
- [34] Qiang Y Q, Zhang J C, Xu X Y, Liu H J, Duan X F. Stem sap flow of *Haloxylon ammodendron* at different ages and its response to physical factors in the Minqin oasis-desert transition zone, China. Journal of Arid Land, 2023, 15(7): 842-857.
- [35] Kim M H, Cho J S, Jeon H W, Sangsawang K, Shim D, Choi Y I, Park E J, Lee H, Ko J H. Wood transcriptome profiling identifies critical pathway genes of secondary wall biosynthesis and novel regulators for vascular cambium development in *Populus*. Genes, 2019, 10(9): 690.
- [36] Du K B, Xu Y M, Wang N N, Qin L Y, Tao J Y. Transcriptomic remodeling occurs during cambium activation and xylem cell development in *Taxodium ascendens*. Current Issues in Molecular Biology, 2024, 46(11): 11927-11941.