

基于拉曼技术的高地钩叶藤导管壁化学成分微区分布研究

汪佑宏¹, 余林鹏¹, 张菲菲^{2*}, 杨明亮¹, 江泽慧^{3*}, 马建锋³, 田根林³

(1. 安徽农业大学 林学与园林学院, 安徽 合肥 230036; 2. 黄山华塑新材料科技有限公司, 安徽 黄山 245900;
3. 国际竹藤中心, 北京 100102)

摘要:为探寻棕榈藤材具有优良韧性的机理和棕榈藤材高值化利用,选择高地钩叶藤为研究对象,利用显微共聚焦拉曼技术,对导管壁化学成分的微区分布进行测试分析。结果表明,高地钩叶藤导管壁纤维素分子浓度为次生壁>复合胞间层>细胞角隅,而木质素分子浓度分布恰好相反。次生壁内、外层纤维素、木质素及半纤维素分子浓度差异较小。在藤茎径向上,藤芯处导管次生壁中层和细胞角隅处木质素的分子浓度最高,藤皮处导管的半纤维素分子浓度最高。藤皮处导管次生壁中层纤维素的分子浓度最低而细胞角隅处却最高,而藤中与藤芯处导管细胞角隅中半纤维素的分子浓度均很小。在藤茎轴向上,随着高度增加藤皮导管次生壁中层木质素和半纤维素分子浓度变化趋势相同,而纤维素分子浓度在藤皮与藤芯间变化趋势完全相反。除导管各壁层的三大素分布呈一定规律性外,在藤茎径向和轴向上规律不明显。

关键词:高地钩叶藤;导管;细胞壁成分;拉曼光谱;化学成分;微区分布

中图分类号:S781

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)02-0203-07

Microdistribution of Chemical Components in the Vessel Wall of *Plectocomia himalayana* Based on Raman Spectroscopy

WANG You-hong¹, YU Lin-peng¹, ZHANG Fei-fei^{2*}, YANG Ming-liang¹, JIANG Ze-hui^{3*},
MA Jian-feng³, TIAN Gen-lin³

(1. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China;
2. Huangshan Huasu New Material Science & Technology Co., Ltd., Huangshan 245900, Anhui, China;
3. International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: The objective of this study was to explore the mechanism of the excellent toughness and the high-value utilization of the rattans. *Plectocomia himalayana* was chosen as the research object. The microdistribution of chemical components in vessel wall was measured and analyzed by using confocal micro-Raman spectroscopy. The results showed that the molecular concentration of cellulose in the vessel wall was in the order of secondary wall>composite intercellular layer>cell corner, and the molecular concentration order of lignin was just the opposite. There was little difference in the molecular concentrations of cellulose, lignin or hemicellulose between the inner and outer layers of the secondary wall. In the radial direction of rattan stem, while the molecular concentrations of lignin in the middle layer of secondary wall of vessel and cell corner at the core were the highest, and the molecular concentration of hemicellulose in the vessel at the cortex was also the highest. The cellulose molecular concentration in middle layer of the secondary wall of vessel in the cortex was the lowest, while it was the highest in cell corner. The molecular concentration

收稿日期:2023-03-29 修回日期:2023-04-04

基金项目:“十四五”国家重点研发计划课题(2022YFD2200901);国家自然科学基金项目(31800476)。

第一作者:汪佑宏,教授,博士(后)。研究方向:生物质材料构造、材性及改性。E-mail:wangyh@ahau.edu.cn

*通信作者:张菲菲,工程师,硕士。研究方向:生物质材料基础理论及材性。E-mail:2434179162@qq.com

江泽慧,教授。研究方向:木材科学与技术。E-mail:jiangzehui@icbr.ac.cn

of hemicellulose in the cell corner in the middle layer (i. e. the layer between core and cortex) and core was very low. In the axial direction of rattan stem, with the increase of height, the variation trend of lignin and hemicellulose molecular concentration in the middle layer of the secondary wall in cortex was the same, however, the variation trend of cellulose molecular concentration between cortex and core was completely opposite. It is concluded that the distributions of cellulose, hemicellulose, and lignin in each wall layer of vessel show a certain regularity, no regularity is found in the radial and axial directions of the rattan stem.

Key words: *Plectocomia himalayana*; vessel; cell wall component; Raman spectra; chemical composition; microdistribution

棕榈藤(rattan)属于热带和亚热带森林中的藤类植物资源,其藤茎为仅次于木竹材、具有多用途的林产品,具有一定的经济价值和开发前景。目前全世界共存棕榈藤 13 属 660 多种,其中我国自然分布有 4 属 43 种,但经济价值较高的商品藤不到全部藤种的 5.0%^[1-2]。

目前,对棕榈藤材的研究主要集中在构造^[3-4]、材性^[5-8]、改性^[8-10]等方面。对于细胞壁化学成分微区分布及变化的研究相对较少,例如利用可见光分光光度计对黄藤不同细胞壁木质素分布进行的相关研究^[11-13],结合运用显微共聚焦荧光和拉曼光谱成像技术,系统研究了黄藤材藤茎中不同类型细胞及同一细胞不同形态区域的木质素化学特点等^[14-15]。相对而言,显微共聚焦拉曼技术的优势在于,当入射光波长等实验条件固定时,可实现对物质进行半定量分析。在与显微技术相结合的情况下,拉曼光谱的优势还表现在不仅样品需求量少、可在水分子上获得光谱^[16],而且通过采用时间分辨技术、选择合适激光频率、加入荧光淬灭剂或强光照射等方法来消除或降低样品的荧光干扰^[17]。

目前,对棕榈藤材细胞壁化学成分的研究主要集中在木质素微区分布上,由于细胞壁不同壁层上的化学组成往往不同,而这又与细胞壁机械强度有着密切的关系。作为曲木家具用材,对棕榈藤材柔韧性有着很高的要求,而导管直径大小对藤茎的坚韧程度又有很大影响^[18]。从目前的研究来看,除导管直径外,导管壁层化学成分等对棕榈藤韧性是否也有影响,尚不得而知。因此,本研究拟采用显微共聚焦拉曼技术,通过对高地钩叶藤导管细胞壁的三大成分的微区分布进行研究分析,探讨其具有优良韧性的影响因素,为棕榈藤材高值化利用、扩大商品藤的种类提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

高地钩叶藤(*Plectocomia himalayana*)属棕榈科(Palmae)钩叶藤属(*Plectocomia*),攀援、丛生,属

于大径藤,一般用于编织较粗糙的藤器或栅栏,主要分布于我国云南西南部。

取生长适中、健康的高地钩叶藤 1 根(不同藤株间,对应部位无法保证为相同年份),在基部、高 2 m 处、中部和梢部 4 个部位(藤径为 13~30 mm,长 16~20 m)分别截取 1 cm 长度试样,软化包埋处理后,用 Leica RM2265 全自动轮转式切片机(Leica biosystems nussloch GmbH)切取厚 10 μm 完好的横切面切片 5 片,室温下用 0.2 mol \cdot L⁻¹ NaBH₄ 溶液浸泡 5~6 h,然后用蒸馏水洗净并浸泡在蒸馏水中备用^[19]。

1.2 方法

分别对基部、高 2 m 处、中部和梢部 4 个部位各取出 1 片切片固定在载玻片上,置于拉曼显微镜下,依次在切片藤皮、藤中及藤芯处各选择 1 个完整的后生木质部大导管分子(以下简称导管)、每个细胞壁上至少选择 3 个点,总共不少于 36 个点,利用 LabRam XploRA 显微共聚焦拉曼光谱仪(Horiba Jobin Yvon Company)采用逐点扫描显微探针成像方法获取光谱数据集[为获得较高的空间分辨率,物镜采用 100 倍油镜(MPlan 100 \times , oil, NA=1.35)进行],再利用 LabSpec5 软件进行处理。其中,扫描步长为 0.8 μm ,激发波长为 532 nm,功率 8 mW,单点采集时间 1 s,狭缝宽度 100 μm ,孔隙大小为 300 μm ,拉曼光谱测试范围为 300~3 200 cm⁻¹^[19]。

2 结果与分析

2.1 化学成分微区分布线谱

图 1 为导管分子次生壁中层(S₂)的平均拉曼光谱,其中纤维素的主要特征峰为 2 894、1 324、1 109、1 085、378 cm⁻¹;木质素的主要特征峰为 1 680、1 598 cm⁻¹。拉曼位移 2 894 cm⁻¹ 归属于纤维素 C—H 和 CH₂ 的对称伸缩振动,1 085 cm⁻¹ 是纤维素 C—O—C 糖苷键的非对称伸缩振动,378 cm⁻¹ 归属于纤维素 β -D 葡萄糖苷键。拉曼位移 1 680 cm⁻¹ 归属于松柏醇或紫丁香醇和松柏醛或紫丁香醛结构,1 598 cm⁻¹ 归属于苯环的对称伸

缩振动。拉曼位移 $1\ 085\ \text{cm}^{-1}$ 是重原子(C—C 和 C—O)的伸缩振动^[19-23]。

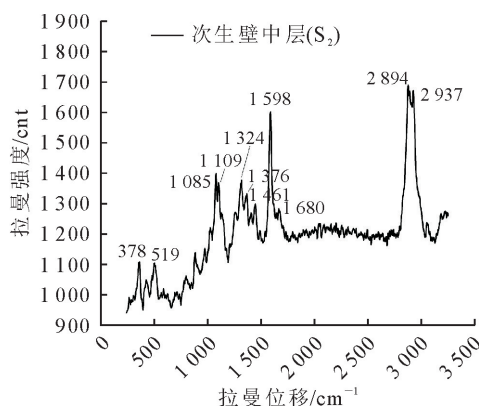


图1 导管分子 S_2 层平均拉曼光谱

Fig.1 Average Raman spectrum of S_2 layer of vessel

图2为导管分子5个不同形态区:细胞角隅(CC),复合胞间层(CML),次生壁外层(S_1),中层(S_2)及内层(S_3)的平均光谱图,线谱范围为 $300\sim3\ 200\ \text{cm}^{-1}$ 。图中在CC和CML中,特征峰 $2\ 937\ \text{cm}^{-1}$ 主要是木质素中甲氧基的C—H键的伸缩振动;而在 S_1 、 S_2 和 S_3 层中,特征峰 $2\ 937\ \text{cm}^{-1}$ 主要是纤维素中C—H键和 CH_2 的伸缩振动。图中可以看出CC图谱中 $2\ 937\ \text{cm}^{-1}$ 特征峰的信号很强,几乎覆盖了 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 处的信号;CML处 $2\ 937\ \text{cm}^{-1}$ 特征峰的信号也比 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 处的信号强;而 S_1 、 S_2 和 S_3 处 $2\ 937\ \text{cm}^{-1}$ 特征峰信号比 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 处的要弱。另外CC图谱中 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$ 的峰强度比 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 高,而在次生壁(S)层中 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰强度比 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 处稍弱^[19]。

由图2中CC、CML和 S_2 这3个形态区的拉曼光谱发现, $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 特征峰处的拉曼强度为 $S_2 > \text{CML} > \text{CC}$,说明导管细胞壁中的纤维素分子浓度为 $S_2 > \text{CML} > \text{CC}$;另一特征峰 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$ 处的拉曼强度为 $\text{CC} > \text{CML} > S_2$,说明木质素分子浓度为 $\text{CC} > \text{CML} > S_2$ 。同时,从 S_1 、 S_2 和 S_3 这3个形态区的拉曼光谱可以看出, $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 特征峰处的拉曼强度在 S_1 、 S_2 和 S_3 3个形态区没有太大的区别,说明这3个形态区纤维素的分子浓度相差不大。 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$ 特征峰处的拉曼强度在 S_1 与 S_2 间差别较小,但比 S_3 处稍强,说明 S_1 与 S_2 层间木质素分子浓度差别较小且均略高于 S_3 层^[19]。

2.2 拉曼成像分析

显微镜下,在试材横切面上选择导管壁进行拉曼成像,并对该扫描区域进行逐点扫描获得拉曼光谱。由于纤维素的拉曼光谱信噪比在 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 处最大,能够得到较清晰的分布图像,而木质素的主

要特征峰在 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$ 处具有较好的信噪比,因此本研究选择在 $2\ 780\sim3\ 060\ \text{cm}^{-1}$ (用C—H以及C— H_2 伸缩振动的空间分布规律来代表导管中纤维素的分布)、 $1\ 550\sim1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ (用苯环的对称伸缩振动的空间分布规律来代表导管中木质素的分布)及 $1\ 026\sim1\ 195\ \text{cm}^{-1}$ (C—C和C—O—C伸缩振动的空间分布规律来代表导管中半纤维素的分布)3个振动区分别进行拉曼成像,结果与主要化学成分微区分布线谱分析相似,如图3所示^[19]。

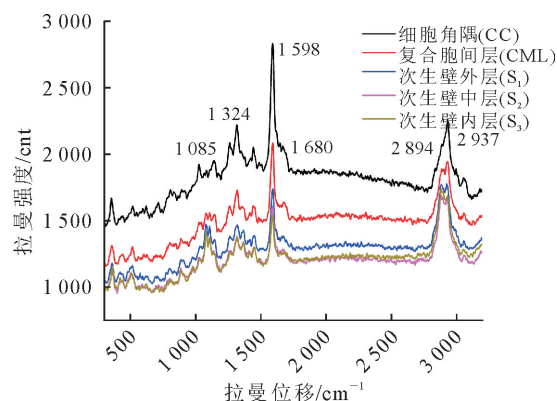


图2 谱线分析后导管分子平均拉曼光谱

Fig.2 Average Raman spectra of vessel after line analysis

图3(a)为显微镜下选择的导管区域,图3(b)、图3(c)、图3(d)分别为导管中纤维素、木质素、半纤维素的空间分布图。如图3(b)所示,在导管分子中可以明显看出纤维素在细胞壁的拉曼信号最强(对比度最亮),说明此处纤维素的分子浓度最高,导管与相邻薄壁细胞的胞间层的纤维素的拉曼信号非常弱(对比度很暗),说明角隅处纤维素的分子浓度很低。如图3(c)所示,细胞角隅处木质素拉曼信号最强(对比度最亮),复合胞间层木质素拉曼信号强度仅次于角隅处,而细胞壁层上的木质素拉曼信号强度比较弱,说明细胞角隅处的木质素分子浓度最高,复合胞间层次之, S 壁层上的木质素分子浓度较低。图3(d)所示,细胞角隅与复合胞间层的拉曼信号对比度都非常暗, S 层上拉曼的信号对比度较亮,但是和图3(b)相比较要暗很多,说明角隅和复合胞间层的半纤维素分子浓度很低, S 层上的半纤维素分子浓度较高但低于纤维素的分子浓度^[19]。

虽然导管分子细胞壁较厚,但是与纤维细胞的拉曼成像图不同的是,导管的拉曼成像图中并没有看到细胞壁上有亮度差异的宽窄层,相反地,导管 S 层的化学成分分布较均匀。图3(b)的成像振动区主要特征峰是 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$,为C—H以及C— H_2 伸缩振动;图3(c)的成像振动区主要特征峰是 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$,为苯环的对称伸缩振动;而图3(d)的

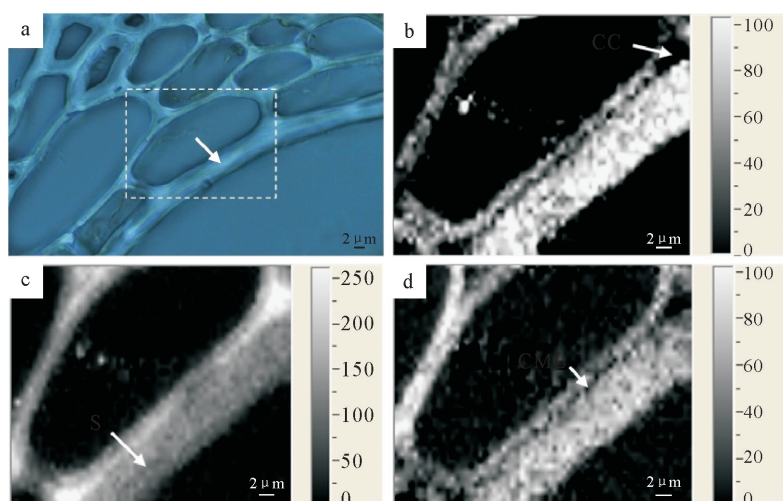


图3 导管(a)与导管中纤维素(b)、木质素(c)、半纤维素(d)的分布图像

Fig. 3 Vessel(a), distribution of cellulose (b), lignin (c) and hemicellulose (d) in vessel

成像振动区主要特征峰是 $1\ 085\ \text{cm}^{-1}$, 为重原子(C—C 和 C—O)的伸缩振动, 对应的主要组分是纤维素、木聚糖和葡甘露聚糖^[19]。

2.3 不同部位的拉曼线谱

2.3.1 藤茎径向变异 在藤皮、藤中和藤芯3个部位的导管分子细胞壁上分别选取具有代表性的 S_2 层与 CC 处的线谱进行线谱分析, 得到结果如图4所示。由图4(a)可以看出, 藤皮与藤芯处的拉曼光谱差异很小, 在特征峰 $2\ 894$ 、 $1\ 680\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$ 处藤芯处的拉曼强度均略高于藤皮处, 说明藤皮处导管 S_2 层的纤维素和木质素的分子浓度略低于藤芯处, 但差异不大; 在特征峰 $1\ 085\ \text{cm}^{-1}$ 处藤皮处的峰强度比藤芯处高, 说明藤皮处导管 S_2 层的半纤维素分子浓度高于藤芯处。图中可以看出藤中处导管 S_2 层的拉曼光谱在 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 085\ \text{cm}^{-1}$ 2个特征峰处的峰强度均明显低于藤皮与藤芯处, 而 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 特征峰处的峰强度明显高于藤皮与藤芯处, 说明导管 S_2 层上的纤维素分子浓度在藤中处最高, 木质素与半纤维素分子浓度在藤中位置最低。其中木质素分子浓度由藤中向藤皮、藤芯逐渐减小, 与黄藤导管木质素浓度, 以及纤维 S_2 中紫丁香基木质素(即 S 基木质素)浓度变化趋势完全相反^[12-13, 19]。

由图4(b)可以看出, 在特征峰 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 处, 藤皮导管 CC 处(即导管与相邻薄壁细胞角隅处)的峰强度最大, 在藤芯处的峰强度最小, 说明该藤材导管角隅处纤维素分子浓度在藤皮处最高, 藤芯处最小。在特征峰 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$ 处, 藤芯处峰强度最高, 其次是藤中, 藤皮最低, 其中藤皮与藤中相差很小, 说明导管 CC 处的木质素分子浓度在藤芯处最高, 在藤皮处最低, 正好与纤维素分子浓度的变化相反。

特征峰 $1\ 085\ \text{cm}^{-1}$ 处, 可以看出藤皮处的峰强度远远高于藤中与藤芯, 且藤中与藤芯处该峰的峰强度较弱, 说明藤中与藤芯位置导管 CC 处半纤维素分子浓度很低, 而藤皮处导管 CC 处半纤维素分子浓度比藤中与藤芯高很多。高地钩叶藤导管 CC 处纤维素、半纤维素及木质素的径向变化趋势, 与其纤维 S_2 层的变化趋势完全一致^[19, 24]。

通过上述分析发现, 不管是 S_2 还是 CC 处, 藤芯处导管木质素的分子浓度最高, 藤皮处导管的半纤维素分子浓度最高。藤皮处导管 S_2 层纤维素的分子浓度最低而 CC 处却最高, 而藤中与藤芯处导管 CC 中半纤维的分子浓度均很小^[19]。

2.3.2 藤茎轴向变异 选取基部、高2 m处、中部和梢部4个部位的藤皮和藤芯导管 S_2 层的线谱进行线谱分析, 结果如图5所示。图5(a)为不同高度藤皮导管的谱图, 可以看出在特征峰 $2\ 894\ \text{cm}^{-1}$ 处, 该峰强度从大到小依次为基部、中部、高2 m处和梢部, 说明该藤材藤皮导管 S_2 层纤维素的分子浓度在基部处最大, 中部的分子浓度大于高2 m处, 梢部的分子浓度最小。在特征峰 $1\ 085\ \text{cm}^{-1}$ 处可以明显地看出不同位置的差异, 峰的强度从大到小依次为高2 m处、梢部、中部、基部, 说明藤皮导管 S_2 层半纤维素的分子浓度在高2 m处最高, 其次是梢部, 在基部位位置的分子浓度最小。在特征峰 $1\ 598\ \text{cm}^{-1}$ 处可以看出, 高2 m处的峰强度最大, 其次是梢部位置, 基部最小, 而基部与中部位置略低于梢部, 且两者差异小, 说明藤皮导管 S_2 层木质素的分子浓度在高2 m处位置最大, 梢部的分子浓度小于高2 m处但略高于中部和基部, 基部位位置的木质素分子浓度最小^[19], 与其半纤维素分子浓度, 以及黄藤薄壁细胞木质素浓度、黄藤藤皮处导管壁木

质素浓度变化趋势完全一致^[11,13]。

图5(b)为不同高度藤芯导管的谱图,可以看出在特征峰 $2\,894\text{ cm}^{-1}$ 处,峰强度从大到小依次为梢部、高2 m处、中部和基部,说明藤芯导管 S_2 层纤维素的分子浓度在梢部位置最大,其次是高2 m处,然后是中部,基部最小,与藤皮处纤维素的分子浓度变化趋势恰好相反。在特征峰 $1\,598\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,680\text{ cm}^{-1}$

处,峰强度由大到小依次为高2 m处、中部、梢部、基部,说明藤芯导管 S_2 层木质素的分子浓度在高2 m处最大,其次是中部,基部最小。在特征峰 $1\,085\text{ cm}^{-1}$ 处,同样是高2 m处的峰强度最大,其次是中部,与 $1\,598\text{ cm}^{-1}$ 处不同的是该峰处梢部的峰强度低于基部,说明藤芯导管 S_2 层半纤维素分子浓度在梢部最小,其次是基部,高2 m处最高^[19]。

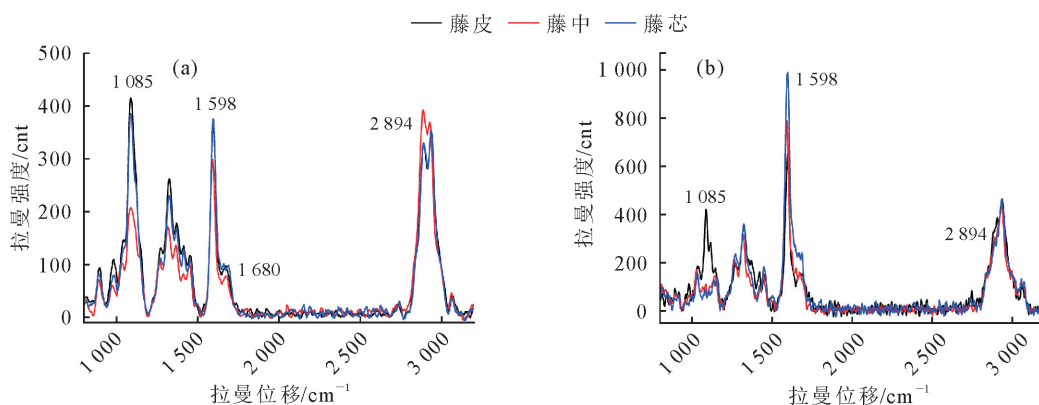


图4 径向不同部位导管分子 S_2 层(a)与CC处(b)拉曼线谱分析

Fig. 4 Ray-spectrum analysis of S_2 layer (a) and CC (b) of vessel in different radial positions

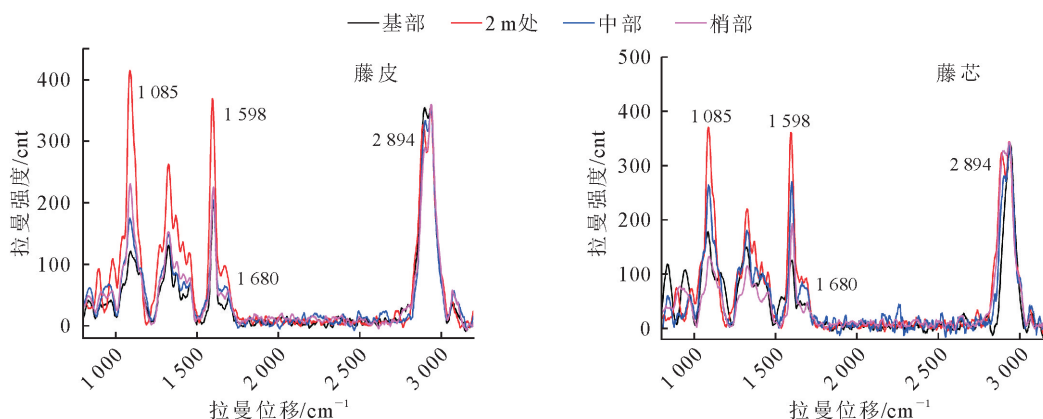


图5 轴向同部位导管分子 S_2 层拉曼线谱分析:藤皮(a)、藤芯(b)

Fig. 5 Raman line spectra of S_2 layer of vessel at different axial positions: cortex (a), core (b)

3 结论与讨论

高地钩叶藤导管分子纤维素分子浓度最高在次生壁,最低在细胞角隅;相反的,木质素分子浓度最低在次生壁,最高在细胞角隅,复合胞间层处的纤维素和木质素分子浓度介于次生壁和细胞角隅处之间,与高地钩叶藤纤维细胞纤维素、木质素分子浓度变化趋势完全一致^[19]。纤维素分子浓度的这种分布,可能缘自细胞次生壁需要承载主要的机械强度的缘故;而木质素分子浓度的上述分布与细胞分化过程中细胞的定型有关。此外,导管分子木质素分子浓度的这种分布规律,不仅与黄藤材纤维细胞壁中木质素分布规律一致^[12,14],而且与木材细胞壁层中木质素分布规律也相同^[25-26]。次生壁内外层

纤维素、木质素及半纤维素分子浓度差异较小,其中次生壁外层和中层木质素分子浓度略高于内层。与利用可见分光光度计对细胞壁木质素微区分布进行定性研究相比^[11-13],结合显微共聚焦荧光和拉曼光谱成像技术,不仅可以系统研究细胞不同形态区域的木质素微区分布^[14-15],而且还可以对纤维素、半纤维素的微区分布进行测试,但在进行物质的半定量测试分析时,还是存在一定的难度。

在藤茎径向上,藤芯处导管次生壁中层和细胞角隅处木质素的分子浓度最高,藤皮处导管的半纤维素分子浓度最高。藤皮处导管次生壁中层纤维素的分子浓度最低而细胞角隅处却最高,而藤中与藤芯处导管细胞角隅中半纤维的分子浓度均很小。

在藤茎轴向上,随着高度增加藤皮导管次生壁

中层木质素和半纤维素分子浓度变化趋势相同,而纤维素分子浓度在藤皮与藤芯间变化趋势完全相反。除导管各壁层的纤维素、半纤维素和木质素分布呈一定规律性外,在藤茎径向和轴向上规律不明显。造成这种结果的原因可能是高地钩叶藤为单子叶植物,只有高生长没有直径生长即只长长不长粗,藤茎是在前一年的基础上通过顶端生长继续向前延伸且每年形成的藤茎长短不一,前后 2 a 所形成的材质部分难以区分;同时,在同一个生长年份内从雨季到旱季,由于温度、降雨量等因素的不同,使导管直径、壁厚、分布密度等因子发生较大变化^[27]。不仅导致基部等不同部位所取试样间相隔年份不同,而且也不能保证所取试样同为雨季或旱季形成的。

总之,高地钩叶藤导管壁纤维素分子浓度为次生壁 > 复合胞间层 > 细胞角隅,而木质素分子浓度为次生壁 < 复合胞间层 < 细胞角隅。次生壁内层、次生壁外层纤维素、木质素及半纤维素分子浓度差异较小。在藤茎径向上,藤芯处导管次生壁中层和细胞角隅处木质素的分子浓度最高,藤皮处导管的半纤维素分子浓度最高。藤皮处导管次生壁中层纤维素的分子浓度最低而细胞角隅处却最高,而藤中与藤芯处导管细胞角隅中半纤维素的分子浓度均很小。在藤茎轴向上随着高度增加,藤皮导管次生壁中层木质素和半纤维素分子浓度变化趋势相同,而纤维素分子浓度在藤皮与藤芯间变化趋势完全相反。除导管各壁层的纤维素、半纤维素和木质素分布呈一定规律性外,在藤茎径向和轴向上规律不明显。

参考文献:

- [1] JIANG Z H, WANG K L. Handbook of Rattan in China[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [2] 王慷林. 多鳞藤属(*Myrialepis*)——中国新分布属[J]. 植物科学学报, 2018, 36(1): 11-16.
WANG K L. *Myrialepis*, a newly recorded genus in China[J]. Plant Science Journal, 2018, 36(1): 11-16. (in Chinese)
- [3] 张菲菲, 汪佑宏, 李担, 等. 高地钩叶藤节间与节部纤维形态特征及组织比量变异分析[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 179-182.
ZHANG F F, WANG Y H, LI D, et al. Variation analysis of fiber morphological characteristics and tissue proportion of *Plectocomia himalayana* between internode and node[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5): 179-182. (in Chinese)
- [4] 王坤, 刘杏娥, 尚莉莉, 等. 单叶省藤发育过程中主要显微解剖特征的变异[J]. 木材加工机械, 2019, 30(1): 17-20, 5.
WANG K, LIU X E, SHANG L L, et al. The variations of anatomical microstructure of *Calamus simplicifolius* during development[J]. Wood Processing Machinery, 2019, 30(1): 17-20, 5. (in Chinese)
- [5] YANG S M, XIANG E L, SHANG L L, et al. Comparison of physical and mechanical properties of four rattan species grown in China[J]. Journal of Wood Science, 2020, 66(3): 3007-3013.
- [6] 曹积微, 袁哲, 强明礼. 云南 3 种棕榈藤材材性分析及开发利用价值评价[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 265-268.
CAO J W, YUAN Z, QIANG M L, et al. Properties analysis and utility value evaluation for three rattan species in Yunnan[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(4): 265-268. (in Chinese)
- [7] 杨利梅, 刘杏娥, 江泽慧, 等. 单叶省藤材水分吸附特性[J]. 林业科学, 2021, 57(7): 150-157.
YANG L M, LIU X E, JIANG Z H, et al. Water adsorption characteristics of *Calamus simplicifolius* cane[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(7): 150-157. (in Chinese)
- [8] 尚莉莉. 钩叶藤材的基本性能及增强增韧改性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [9] 薛夏, 任伟, 汪佑宏, 等. 纳米二氧化硅及酚醛树脂对粉藤材主要物理性质的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 254-257.
XUE X, REN W, WANG Y H, et al. Effects of nano silica and phenolic resin on main physical properties of *Calamus* sp. [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 254-257. (in Chinese)
- [10] 李担. 高温热处理对单叶省藤性能的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [11] 汪佑宏, 刘杏娥, 江泽慧, 等. 黄藤材薄壁细胞木质素分布的可见光谱分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 140-142.
WANG Y H, LIU X E, JIANG Z H, et al. Analysis of the visible spectrum of lignin distribution in the parenchyma *Daemonorops margaritae*[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2012, 36(6): 140-142. (in Chinese)
- [12] 汪佑宏, 刘杏娥, 江泽慧, 等. 黄藤材纤维细胞木质素分布[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 34(5): 41-44.
WANG Y H, LIU X E, JIANG Z H, et al. Lignin distribution of *Daemonorops margaritae* fiber[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2014, 34(5): 41-44. (in Chinese)
- [13] 王瑞, 汪佑宏, 刘杏娥, 等. 黄藤材导管壁木质素分布可见光谱分析[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(8): 50-51, 67.
WANG R, WANG Y H, LIU X E, et al. Visible spectrum of lignin distribution in vessel wall of *Daemonorops margaritae* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(8): 50-51, 67. (in Chinese)
- [14] 刘杏娥, 金克霞, 崔贺帅, 等. 黄藤细胞壁木质素区域化学分子光谱成像研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(10): 3138-3144.
LIU X E, JIN K X, CUI H S, et al. The lignin topochemistry of *Daemonorops margaritae* (Hance) Becc. by molecular spectroscopic imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(10): 3138-3144. (in Chinese)
- [15] GIERLINGER N, BURGERT I. Secondary cell wall polymers studied by confocal Raman microscopy-spatial distribution, or-

- rientation and molecular deformation[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2006, 36(1): 60-71.
- [16] 屠一锋. 现代仪器分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 195-200.
- [17] 夏之宁. 光分析化学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004: 150-152.
- [18] 腰希申, 李旸, 许煌灿, 等. 棕榈藤的电镜观察——I 藤基部分的电镜观察[J]. 林业科学, 1998, 34(3): 104-109.
YAO X S, LI Y, XU H C, *et al.* The observation with E. M. of rattan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1998, 34(3): 104-109. (in Chinese)
- [19] 张菲菲. 高地钩叶藤材构造和主要化学成分及微区分布[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [20] AGARWAL U P. An overview of Raman spectroscopy as applied to lignocellulosic materials. In DS Argyropoulos, ed, Advances in Lignocellulosics Characterization [A]. TAPPI Press, Atlanta, pp 1999, 209-225.
- [21] AGARWAL U P, RALPH S. FT-Raman spectroscopy of wood: identifying contributions of lignin and carbohydrate polymers in the spectrum of black spruce (*Picea mariana*) [J]. Appl Spectrosc, 1997, 51: 1648-1655.
- [22] EDWARDS H G M, FARWELL D W, WEBSTER D. FT Raman microscopy of untreated natural plant fibres[A]. Spectrochim Acta, 1997, 53: 2383-2392.
- [23] SAARIAHO A M, JÄÄSKELÄINEN A S, NUOPPONEN M, *et al.* Ultra violet resonance Raman spectroscopy in lignin analysis: determination of characteristic vibrations of p-hydroxyphenyl, guaiacyl, and syringyl lignin structures[J]. Appl Spectrosc, 2003, 57: 58-66.
- [24] 张菲菲, 季必超, 汪佑宏, 等. 拉曼光谱对高地钩叶藤纤维 S₂ 层主要成分的预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(1): 179-183.
ZHANG F F, JI B C, WANG Y H, *et al.* Prediction of the main components in S₂ of *Plectocomia himalayana* fiber based on Raman spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(1): 179-183. (in Chinese)
- [25] 尹思慈. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 80.
- [26] 刘苍伟, 苏明垒, 周贤武, 等. FTIR 及 CLSM 对转基因杨木细胞壁木质素含量及微区分布研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3404-3408.
LIU C W, SU M L, ZHOU X W, *et al.* Analysis of content and distribution of lignin in cell wall of transgenic poplar with fourier infrared spectrun (FTIR) and confocal laser scanning microscopy (CLSM) [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(11): 3404-3408. (in Chinese)
- [27] 张菲菲, 李坦, 汪佑宏, 等. 棕榈藤材藤龄判断初探[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(6): 26-29.
ZHANG F F, LI D, WANG Y H, *et al.* Judgment of rattan age[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(6): 26-29. (in Chinese)

(上接第 59 页)

- [13] 蒋路平, 王景源, 张鹏, 等. 170 个红松无性系生长及结实性状变异及选择[J]. 林业科学研究, 2019, 32(1): 58-64.
- [14] BRADFORD J B and DAMATO A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, 10(4): 210-216.
- [15] 张伟. 黄土丘陵区人工林草植被生态服务功能演变及其互作机制[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [16] 袁坤宇, 曹扬, 杨洁, 等. 黄土残塬沟壑区不同林龄与坡向人工刺槐林生态系统服务协同关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 97-105.
- [17] 孙菲菲, 张增祥, 左丽君, 等. 冀西北水源涵养区不同类型人工针叶林生态功能差异性评估[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1348-1359.
SUN F F, ZHANG Z X, ZUO L J, *et al.* Difference assessment on ecological functions of artificial coniferous forests in water conservation area of Northwestern Hebei[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1348-1359. (in Chinese)
- [18] 崔静, 黄佳健, 陈云明, 等. 黄土丘陵区人工柠条林下草本植物物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 14-20.
CUI J, HUANG J J, CHEN Y M, *et al.* Biodiversity of herbaceous species under *Caragana microphylla* plantations in Loess Hilly Region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3): 14-20. (in Chinese)
- [19] 李哲, 董宁宁, 侯琳, 等. 秦岭山地不同龄组锐齿栎林土壤和枯落物有机碳、全氮特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(12): 127-132, 138.
LI Z, DONG N N, HOU L, *et al.* Characteristics of soil and litter organic carbon and total nitrogen in different age groups of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests in the Qinling Mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(12): 127-132, 138. (in Chinese)
- [20] JNSSON M, SNULLT, Leverkus A B. Ecosystem service multifunctionality of low-productivity forests and implications for conservation and management[J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 57(4): 695-706.
- [21] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947. (in Chinese)
- [22] 郭雯, 黄宏亮, 王锐, 等. 毛竹及其变种细根化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 692-700.
- [23] 贾忠奎, 公宁宁, 姚凯, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林生产力对坡向的响应[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 163-169.
JIA Z K, GONG N N, YAO K, *et al.* Response of *Larix principis-rupprechtii* plantation productivity on slope aspects[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(4): 163-169. (in Chinese)
- [24] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄, 等. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 7-12.
ZHOU P, LIU G B, HOU X L, *et al.* Study on soil physical and nutrients properties of different slope aspects and positions in Eroded Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 7-12. (in Chinese)