

先进材料

三种散孔材植物纤维化学特征的比较

岳大然^a, 梁昌宝^a, 张嘉怡^a, 郭芷良^b

(海南大学 a.林学院 b.应用科技学院, 海南 儋州 571737)

摘要: **目的** 以海南橡胶木为原料, 对其化学全组分(灰分、综纤维素、酸不溶木素、聚戊糖、 α -纤维素、NaOH(1%)抽出物、苯醇抽出物、淀粉和蛋白质)含量进行测定, 观察和研究橡胶木的微观结构, 并与典型阔叶材杨木和桦木进行对比分析, 明确海南橡胶木的化学组分和微观结构特征。**方法** 采用植物显微技术结合化学组分测定的国家标准予以分析。**结果** 海南橡胶木的木素、综纤维素、灰分、聚戊糖、 α -纤维素、抽出物与杨木和桦木存在微量差异, 其淀粉和蛋白质含量远高于典型阔叶材杨木和桦木; 橡胶木纤维的长度为 1 176.68 μm , 宽度为 21.35 μm , 长宽比约为 55.11, 壁腔比为 0.49; 橡胶木属散孔材, 木射线组织呈异型I和异型II, 木纤维具有纤维管胞和角质木纤维, 轴向薄壁组织有傍管薄壁组织和离管薄壁组织 2 种。**结论** 较高的纤维素和较低的木素、苯醇抽出物含量, 较大的长宽比及较小的壁腔比, 使得橡胶木在制浆过程中所消耗的脱木素和漂白药剂更少, 蒸煮时间更短, 制浆得率更高, 纤维交织能力更强, 纤维分布更密, 纸张结合强度更高, 较为适宜作为制备力学性能优良的纸基包装材料的重要基材。

关键词: 橡胶木; 化学组分; 微观结构; 包装材料

中图分类号: S781.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)09-0147-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.018

Comparative Study on the Chemical Characteristics of Lignocellulosic Chemistry of Three Diffuse Porous Wood

YUE Da-ran^a, LIANG Chang-bao^a, ZHANG Jia-yi^a, GUO Zhi-liang^b

(a. College of Forestry, b. School of Applied Science and Technology, Hainan University, Hainan Danzhou 571737, China)

ABSTRACT: The work aims to take Hainan rubber wood as the raw material to determine the content of its chemical components (ash, holocellulose, lignin, hemicellulose, α -cellulose, 1% NaOH extract, phenyl alcohol extract, starch and protein), observe and study its microstructure and compare it with typical hardwood poplar and birch, to clarify its chemical components and microstructure characteristics. Plant microscopic techniques and Chinese national standards for chemical component determination were used in combination for analysis. The lignin, holocellulose, ash, hemicellulose, α -cellulose and extracts of Hainan rubber wood were slightly different from those of hardwood poplar and birch, but its starch and protein content were much higher than those of typical hardwood poplar and birch. The fiber length of rubber wood was 1 176.68 μm , the width was 21.35 μm , the aspect ratio was about 55.11, and the cell ratio was 0.49. Rubber wood was a diffuse porous wood. The wood ray structure was heteromorphic I and heteromorphic II. The wood fibers were tracheid and keratinous wood fibers. The axial parenchyma had two types: adjacent parenchyma and off-tube pa-

收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目(320RC468); 海南省重点研发计划(ZDYF2021XDNY196); 海南大学科研启动基金(KYQD ZR 1986)

作者简介: 岳大然(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为植物资源高值化利用及农林废弃物综合利用等。

renchyma. The higher content of cellulose and lower content of lignin and phenyl alcohol extracts, the larger aspect ratio and the smaller cell ratio make the rubber wood pulp process consume less delignification and bleaching agents, so the streaming time is shorter, pulping yield is higher, fiber intertwining ability is stronger, fiber distribution is denser and paper binding strength is higher. It is more suitable as an important substrate for the preparation of paper-based packaging materials with excellent mechanical properties.

KEY WORDS: rubber wood; chemical components; microstructure; packaging materials

近年来,随着科学技术的迅猛发展,人们对石油、煤炭、天然气等化石资源的需求日益增加^[1]。化石资源的大量使用严重破坏了生态系统,同时所带来的能源枯竭问题愈加严重^[2],因此新型环境友好型材料的研发逐步引起了各界的广泛关注。木材作为可再生、可降解、储量丰富、绿色环保的生物质材料,不仅在医疗、建筑、食品、能源等传统领域扮演着重要角色^[3],在生物工程、清洁能源、仿生智能等新兴领域也展现了其独有的魅力^[4]。由于全球树木种类繁多,目前仍有大量木材缺乏基础特性研究,这限制了木材的高附加值利用,因此对树种清晰全面的认识将有助于进行资源化利用。

橡胶木是橡胶生产加工的剩余物。由于橡胶生产具有周期性,生长 25~30 a 后的橡胶树需进行砍伐更新,因而产生了大量的橡胶木原木。我国的云南省、海南省和广东省是橡胶树的主要种植区,其栽培面积可达 11 390 km²,产生了大量的橡胶木^[5]。目前,橡胶木多用于家具制造、室内装饰和人造板等领域^[6],仅有少数科研工作者对橡胶木的材性进行了研究,全面、系统地分析其化学组分和生物形态的相关研究较少。杨木和桦木作为阔叶材的典型树种,具有适应性广、价廉易得、利用范围广等特性。鉴于此,文中通过植物纤维化学研究手段对海南橡胶木的主要化学组分和微量组分,尤其是淀粉、蛋白质等代表性组分的含量进行测定,并与杨木、桦木等典型阔叶材进行对比分析,确定海南橡胶木的化学组分特点;采用植物显微技术和分析方法对海南橡胶木的微观形貌进行观察和研究,了解其独特的微观结构,研究结果可为橡胶木资源功能化开发及高附加值利用率提升奠定理论基础和数据支撑。

1 实验

1.1 材料和设备

主要材料为橡胶木(Hevea brasiliensis Muell. Arg, 海南省儋州市)、杨木(Populus, 黑龙江省哈尔滨市)、桦木(Betula, 黑龙江大兴安岭),树龄为 10 a,沿树高方向截取 3.0~6.0 m 处的原木段,在室温下进行气干。然后在圆盘中间部位进行取样,木粉为 40~60 目,用于组分分析;木片尺寸约为 1 mm×2 mm×30 mm,用于纤维形态观察;木片

尺寸约为 5 mm×5 mm×20 mm,用于纤维壁腔比的测量。苯、无水乙醇、亚氯酸钠、冰乙酸、氢氧化钠、硫酸、盐酸、丙酮、碘化钾、溴酸钠、溴化钠、硫代硫酸钠均为分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司。

主要仪器:植物粉碎机 JFSD-100,上海嘉定粮油仪器有限公司;标准检验筛,上虞市华丰五金仪器有限公司;电子调温电热套 98-I-B,天津市泰斯特仪器有限公司;电子分析天平 ME204/02,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;恒温水浴锅 DK-98-IIA,天津市泰斯特仪器有限公司;循环水式真空泵 SHB-B95A,郑州市长城科工贸有限公司;电热鼓风干燥箱 GZX-9146MBE,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;正置显微镜 ECLIPSE Ci-L,尼康(上海)仪器有限公司;扫描电子显微镜库塞姆(COXEM)EM-30。

1.2 化学组分测定

测定分析橡胶木的灰分、NaOH(1%)抽出物、苯醇抽出物、综纤维素、酸不溶木素、多戊糖、 α -纤维素等含量(文中所有含量均为质量分数)。同时测定橡胶木、杨木和桦木的淀粉、蛋白质含量。此外,杨木和桦木的其他组分参考已有文献。测定方法按照国家标准执行,方法如下。

1) 原料分析试样参照 GB/T 2677.1—1995《造纸原料分析用试样的采取》。

2) 灰分参照 GB/T 742—2008《造纸原料、制浆、纸和纸板灰分的测定》。

3) NaOH(1%)抽出物参照 GB/T 2677.5—1993《造纸原料 1%氢氧化钠抽出物含量的测定》。

4) 苯醇抽出物参照 GB/T 2677.6—1994《造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定》。

5) 综纤维素参照 GB/T 2677.10—1995《造纸原料综纤维素含量的测定》。

6) 酸不溶木素参照 GB/T 2677.8—1994《造纸原料酸不溶木素含量的测定》。

7) 多戊糖参照 GB/T 2677.9—1994《造纸原料多戊糖含量的测定》。

8) α -纤维素参照 GB/T 744—1989《纸浆 α -纤维素的测定》。

9) 蛋白质参照 GB/T 35809—2018《林业生物质原料分析方法蛋白质含量测定》。

10) 淀粉参照 GB/T 35811—2018《林业生物质原料分析方法淀粉测定》。

1.3 纤维形态测定

采用植物显微技术和分析方法对橡胶木生物的形态特征进行分析。纤维长度和宽度是衡量造纸原料和纸浆的重要指标, 它与纸张的抗张强度和撕裂度呈正相关。选取代表性样品, 沿纵向切成约为 1 mm×2 mm×30 mm 的试样, 置于电子调温电热套中煮沸, 直至试样沉底; 然后将样品置于 60 °C 的冰醋酸和过氧化氢混合溶液 (体积比为 1:1) 中浸渍 36 h, 使得纤维分散均匀; 随后将样品洗涤至中性, 置于尼康 ECLIPSE Ci-L 光学显微镜下观察, 并测量纤维的长度和宽度^[7]。将代表性样品切成 5 mm×5 mm×20 mm 的试样, 置于水中反复煮沸, 排除试样的空气。将试样置于甘油酒精溶液中, 待其软化后用旋转式切片机切片。采用番红染色, 并置于显微镜下观察并测量, 得出纤维壁腔比。取橡胶木、杨木和桦木的代表性样品, 置于库塞姆 (COXEM) EM-30 扫描电子显微镜下观察其横切面和弦切面, 分析 3 种材料在微观形貌上的差异。

2 结果与讨论

2.1 化学组分分析

植物原料中的化学成分复杂, 主要分为细胞壁结构物质 (主要成分) 和细胞壁非结构物质 (少量成分) 两大类。一般而言, 主要成分包括纤维素、半纤维素和木质素; 少量成分包括树脂、脂肪、蜡、果胶淀粉、蛋白质和无机物等, 可通过冷/热水抽出物、NaOH (1%) 抽出物、有机溶剂抽出物和灰分含量等来表示。3 种散孔材的化学组分含量见表 1^[8-9], 结果对木材的利用十分重要。

2.1.1 灰分

植物原料经高温碳化和灼烧所留固体残渣称为灰分, 主要包括钾、钙、钠、镁、硫、磷、硅等无机盐类。灰分的含量为植物原料中无机物的总量。一般来说, 温带树木的无机物含量在 0.1%~1.0% 之间, 但热带树木的无机物含量可达 5%^[10]。由表 1 可知, 橡胶木的灰分含量为 1.62%, 略高于杨木 (0.66%) 和桦木 (0.33%)。

2.1.2 NaOH (1%) 抽出物

植物纤维原料中的 NaOH (1%) 抽出物为半纤维

素和降解短链纤维素的总和。NaOH (1%) 抽出物含量可在一定程度上反映木材变质和腐朽的程度, 其抽出物含量越高, 变质腐朽程度越严重。有学者报道, NaOH (1%) 抽出物含量的高低与碱法制浆过程中的耗碱量呈正相关^[11]。可见, 橡胶木的 NaOH (1%) 抽出物含量为 22.23%, 它在碱法制浆中的耗碱量相对较高。此外, 抽出物的占比在一定程度上可预估橡胶木在碱法制浆中的纸浆得率。

2.1.3 苯醇抽出物

植物原料中的有机溶剂抽出物指可溶解于非极性有机溶剂的化合物。主要包括脂肪、树脂、蜡、单宁、色素等, 通常作为植物原料中树脂成分的代表。通常, 不同原料有机抽出物之间存在差异。阔叶材有机溶剂抽出物主要存在于薄壁细胞和木射线细胞中, 其内主要包含游离及酯化的脂肪酸、中性物质, 不含或只含少量微量萜烯类化合物等, 其含量在 1% 以下。由表 1 可知, 3 种木材的苯醇抽出物含量依次为杨木 (3.48%) > 桦木 (3.08%) > 橡胶木 (2.12%)。有机溶剂抽出物的含量越低, 毛细管输运通道堵塞越少, 在水解过程中化学药品的消耗量相应减少, 同时也减小了对生态环境的污染。

2.1.4 综纤维素

植物纤维原料在去除抽出物和木素后, 所留的全部碳水化合物统称为综纤维素, 即纤维素和半纤维素的总和。综纤维素作为构成木材细胞壁的主要成分, 其含量的高低直接影响木材的加工性能。由表 1 可知, 3 种木材的综纤维素含量依次为杨木 (78.36%) > 橡胶木 (77.38%) > 桦木 (74.90%), 三者并无显著差异, 且满足纸浆材料对碳水化合物的需求。

2.1.5 α-纤维素

纤维素是由 β-D-吡喃葡萄糖基以 1,4-β 苷键连结而成的高分子化合物, 其本身为白色, 具有吸水润胀特性, 组成的微细纤维构成了纤维细胞壁网状骨架。纤维素作为可再生资源, 不仅在造纸、包装、纺织、木材工业等传统领域有着重要用途, 而且在航空、医疗、电子、建筑及能源等新兴领域也扮演着重要角色^[12]。其中, 纸基包装材料中的纤维素含量、尺寸与性能有着密切联系, 原料中的纤维素含量越高, 制浆得率越高, 浆料质量越好, 纸张强度越大。研究发现, 橡胶木的纤维素含量为 50.71%, 高于杨木 (48.05%) 和桦木 (41.82%)^[13-14]。可见, 丰富的纤维素含量使得海南橡胶木成为纤维素基包装材料加工制备的重要基材。

表 1 橡胶木、杨木^[8]和桦木^[9]化学组分含量 (质量分数)
Tab.1 Contents of chemical components of rubber wood, poplar^[8] and birch^[9]

材料	灰分	NaOH (1%) 抽出物	苯醇 抽出物	淀粉	蛋白质	综纤维素	酸不溶木素	聚戊糖	α-纤维素
橡胶木	1.62	22.23	2.12	11.90	2.60	77.38	15.87	21.51	50.71
杨木	0.66	15.74	3.48	5.22	0.70	78.36	19.85	25.93	48.05
桦木	0.33	16.48	3.08	6.46	0.72	74.90	20.37	30.37	41.82

2.1.6 酸不溶木素

木素是以苯基丙烷结构为单元,通过碳—碳键和醚键连接而成的具有三维空间结构的高分子化合物。木素的结构主要由愈创木基丙烷、紫丁香基丙烷和对羟基丙烷组成,不同植物纤维原料之间的木素含量存在差异。其中,针叶材的木素含量(均用质量分数表示)约为 25%~35%,阔叶材的木素含量约为 20%~25%,禾本科植物的木素含量约为 15%~25%^[10]。木素在植物木质化组织中担任胶黏剂的角色,赋予了植物较高的机械强度,因此木素含量越高,植物纤维分离越困难。由表 1 可知,橡胶木的木素含量为 15.87%,其含量相对较低。显然,木素含量越低,在脱木素和漂白工艺中化学药剂的消耗量越少,蒸煮时间越短,且纸浆得率越大,纸张的透明度越高。

2.1.7 聚戊糖

植物细胞壁中的聚糖混合物将纤维素与木素紧密连接在一起,此聚糖混合物为半纤维素。半纤维素是由多种单糖构成的异质多聚体,大多带有短的支链,主要包括己糖、戊糖、木糖、阿拉伯糖和半乳糖等五碳糖和六碳糖。半纤维素的化学性和热稳定性较低,可能归结于低聚合度和非结晶聚集态。由表 1 可知,3 种木材的半纤维素含量依次为 30.37%(桦木) > 25.93%(杨木) > 21.51%(橡胶木)。半纤维素含量的提高能够有效增强纤维之间的结合,提升纸张的紧度。从纸基包装材料角度考虑,海南橡胶木的半纤维素含量较低,在制浆过程中应尽可能多地保留半纤维素,以增强纤维的结合力。

2.1.8 淀粉

淀粉是由葡萄糖残基组成的多糖,可为植物贮存能量。植物的淀粉含量较高,易遭受虫蛀和腐朽侵害,因此淀粉含量对植物的生长和利用存在巨大影响。由表 1 可知,橡胶木的淀粉含量达到 11.90%,远高于杨木(5.22%)和桦木(6.46%)。较高的淀粉含量对于木材加工,既有利也有弊,一方面,较高的淀粉含量极易使橡胶木遭受真菌滋生和昆虫蛀蚀,导致木材易发生霉变、干燥红变等现象,从而影响木材的美观性和耐久性,在橡胶木高品质利用过程中需重点考虑和解决;另一方面,采用热处理改性木材时,淀粉糊化可有效延迟木材细胞壁的热降解时间,使改性木材的性能更接近初始状态。对于纸基包装材料,淀粉能够增加纸的强度,其本身也有与纤维素相同的极性羟基,羟基通过氢键结合,使得纤维间的结合更为牢固,

可能引起纸基包装材料强度的升高。

2.1.9 蛋白质

蛋白质是由氨基酸经“脱水缩合”方式组成的肽链经弯曲折叠形成的具有一定空间结构的高分子化合物。蛋白质是所有生物体中主要的生物分子,是构成细胞的基本有机物。通常木材纤维原料中蛋白质的质量分数不超过 1%,但橡胶木中蛋白质的质量分数高达 2.60%,高蛋白含量高更易使橡胶木遭受腐蚀伤害。

综上所述,橡胶木纤维素、半纤维素、木素、灰分和抽出物等化学组分含量与典型阔叶材杨木和桦木之间存在微量差异。其中,橡胶木的纤维素含量较高,木素和苯醇抽出物的含量相对较低,在制浆过程中橡胶木在脱木素和漂白时所消耗的化学药剂量相对较少,蒸煮时间缩短,制浆得率更高,浆料质量更好,其打浆性能和纸张强度明显优于杨木和桦木,较适宜作为制备力学性能优良纸基包装材料的重要基材。此外,橡胶木中的淀粉和蛋白质含量远高于普通阔叶材中的含量。较高的淀粉和蛋白质含量使得橡胶木在采伐后如果未及时进行防腐处理,则极易遭受木腐菌、霉菌和变色菌等真菌的侵害,从而发生蓝变、红变和霉变。同时也易遭受粉蠹虫等昆虫蛀蚀而腐朽,从而影响木材的色泽、纹理和强度等外观品质和力学性能。这样限制了橡胶木作为木质包装材料的高附加值利用,这也正是橡胶木区别于其他木材的显著特征。通过对橡胶木化学组分的全面认识,其结果将有助于科研工作者根据橡胶木自身特点有针对性地进行制浆工艺优化,以及木材防腐处理,达到节能降耗、绿色环保及抑制真菌生存或阻止繁殖的目的,从而提升橡胶木作为木质包装材料和纸基包装材料的产业化、功能化价值,延长包装材料的使用寿命。

2.2 生物形态分析

纤维长度、宽度和长宽比不仅与木材的性质和功能化利用息息相关,同时也是评价纸基包装材料性能的重要指标。由表 2 可知^[15],橡胶木的纤维长度为 1 176.68 μm ,桦木的纤维长度为 1 412.55 μm ,均高于杨木的纤维长度(970 μm);3 种木材的宽度无明显差别;橡胶木(55.11)和桦木(54.16)的长宽比大于杨木(42.0)。在制浆造纸领域,一般木材的长宽比大于 35 则属于优质造纸原料,长宽比越大则纤维的交织能力越强,在成纸时单位面积中纤维之间相互交织次数增加,纤维分布细密,故纸张的抗张强度、撕裂度和耐折度均较高。

表 2 橡胶木、杨木和桦木^[15]生物形态
Tab.2 Fiber morphology of rubber wood, poplar^[15] and birch

树种	长度/ μm	宽度/ μm	长宽比	壁厚/ μm	胞腔/ μm	壁腔比
橡胶木	1 176.68	21.35	55.11	6.28	12.6	0.49
杨木	970	22.87	42.0	4.90	12.06	0.81
桦木	1 412.55	26.85	54.16	10.78	26.95	0.40

纤维壁腔比指纤维的壁厚与腔径之比,它是衡量植物纤维原料价值的重要指标。有学者认为,纤维壁腔比小于1的材料为优质造纸原料,在成纸时其纤维间的接触面积较大、结合力较强,所制纸张具有良好的柔韧性;纤维壁腔比大于1的材料为次等造纸原料,所制纸张的吸水性较好。研究表明,橡胶木、桦木和杨木的纤维壁腔比分别为0.49、0.40、0.81,因此橡胶木和桦木的纤维特性优于杨木。基于此,橡胶木和桦木的纤维具有接触面积大、交织能力强、纤维分布细密、结合强度高特点,以其为原料制成的纸基包装材料可能会有较高的抗张强度和耐破度等^[10]

研究表明,橡胶木、桦木和杨木的横切面、弦切面(图1)均由导管、轴向薄壁细胞、木纤维及木射线等组成^[16]。导管是由轴向细胞形成的管状组织,在横切面上呈现孔状。橡胶木属散孔材,以单管孔为主,

偶尔可见2~6个径向排列的复管孔,橡胶木的导管孔径较大;木射线主要由横卧和直立细胞组成,单列和多列射线并存,呈异形I型和II型^[17];木纤维多以纤维状管胞和角质木纤维为主,壁薄且胞腔中存在大量球状类颗粒物,即淀粉颗粒。这进一步证实橡胶木的淀粉含量高,淀粉颗粒在细胞内的积累和填充也正是橡胶树幼茎木材发育的一个显著特征^[18-9],轴向薄壁组织排列状态呈现傍管薄壁组织和离管薄壁组织状^[20]。

桦木的导管横切面为椭圆形,导管类型为单管孔及复管孔,导管分子呈复穿孔,且穿孔上存在大量横条;木射线非叠生,同行单列及多列,偶尔可见异形III型;木纤维由纤维管胞和韧性木纤维组成且壁薄;轴向薄壁组织多为轮界状和星散状。杨木导管的类型为单管孔和复管孔(2~6个),未见侵填体;木射线组织为同行单列。

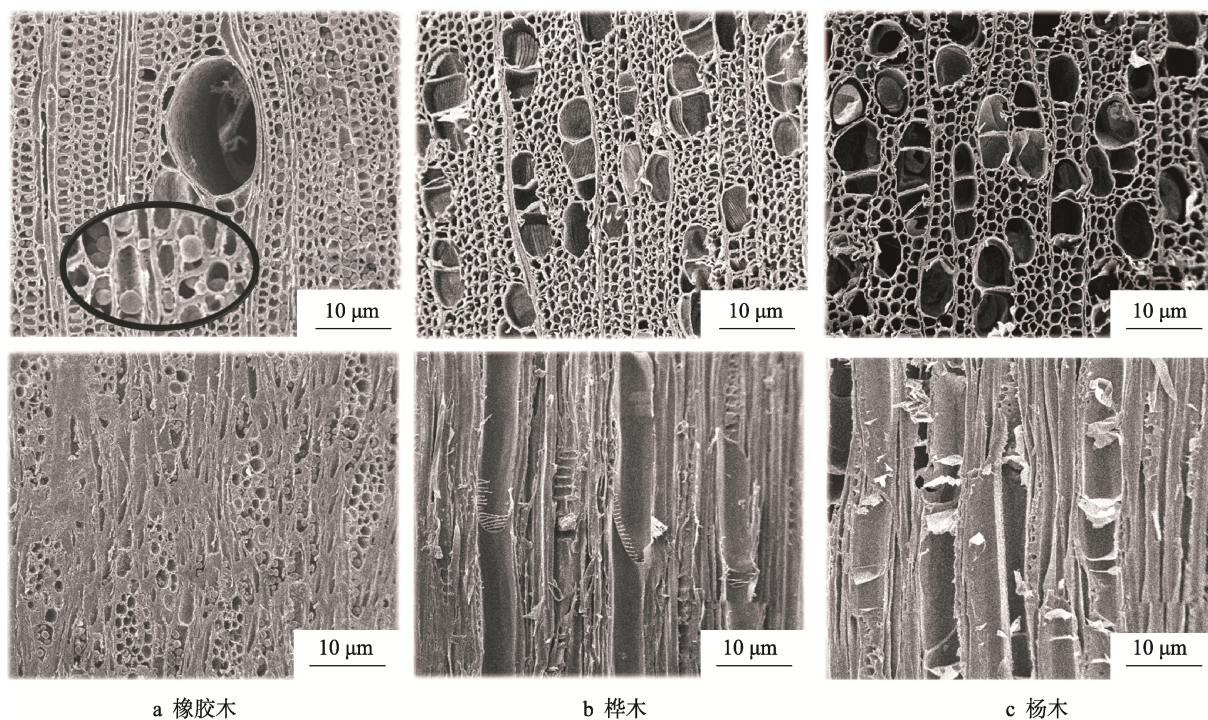


图1 3种散孔材的横切面和弦切面

Fig.1 Transverse section and tangential section of three diffuse porous wood

3 结语

1) 化学组分分析表明,橡胶木的纤维素、木素、半纤维素、抽出物和灰分等含量与典型阔叶材杨木和桦木之间无显著差异,但其淀粉(11.90%)和蛋白质(2.60%)含量远高于其他典型阔叶材。

2) 显微形态及微观结构分析表明,橡胶木纤维长度为1 176.68 μm、宽度为21.35 μm、长宽比为55.11、壁腔比为0.49;橡胶木树干由导管、轴向薄壁细胞、木纤维及木射线等细胞组成,木纤维多以纤维状管胞和角质木纤维为主,壁薄且胞腔中存在大量

球状类颗粒物,即淀粉颗粒。

基于上述分析可知,淀粉和蛋白质含量高的橡胶木为木腐菌、霉菌和变色菌的繁殖提供了得天独厚的天然条件和丰富的营养物质,限制了橡胶木的高附加值利用。由此,通过对橡胶木进行前期防腐处理,以降低其淀粉、蛋白质含量的负面影响,借助施胶、浸渍和表面涂布等方法添加壳聚糖、聚乳酸、卡拉胶等天然高分子生物基聚合物,制备出复合型生物基可降解复合材料,从而提高橡胶木基复合材料的耐用性、持久性和美观性,这是拓宽橡胶木使用范围的必然选择。通过对橡胶木的化学组分、纤维形态及微观形貌

等基础特征进行系统分析,其研究结果势必为海南橡胶木高值化利用和产业化研发奠定植物纤维化学理论基础。

参考文献:

- [1] 周子丹. 木质纤维素纳米复合材料制备及催化应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 87.
ZHOU Zi-dan. Study on Preparation and Catalytic Application of Lignocellulose Nanocomposites[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 87.
- [2] 叶代勇, 黄洪, 傅和青, 等. 纤维素化学研究进展[J]. 化工学报, 2006, 57(8): 1782-1791.
YE Dai-yong, HUANG Hong, FU He-qing, et al. Advances in Cellulose Chemistry[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006, 57(8): 1782-1791.
- [3] THOMAS B, RAJ M C, ATHIRA K B, et al. Nanocellulose, a Versatile Green Platform: From Biosources to Materials and Their Applications[J]. Chemical Reviews, 2018, 118(24): 11575-11625.
- [4] ZHU Hong-li, LUO Wei, CIESIELSKI P N, et al. Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(16): 9305-9374.
- [5] 田婉莹, 操戈, 邓卫哲. 我国橡胶木生产开启“零添加”环保型产业化应用[N]. 农民日报, 2022-12-06(7).
TIAN Wan-ying, CAO Ge, DENG Wei-zhe. "Zero Additives" Environment-friendly Industrialization Application Started in Rubber Wood Timber in China[N]. Farmer's Daily, 2022-12-06(7).
- [6] 李家宁, 林位夫, 谢贵水, 等. 海南橡胶树木材加工利用现状[J]. 热带农业科学, 2010, 30(3): 67-70.
LI Jia-ning, LIN Wei-fu, XIE Gui-shui, et al. Status of Rubber-Wood Processing and Utilization in Hainan Province[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2010, 30(3): 67-70.
- [7] 王菊华. 《中国造纸原料纤维特性及显微图谱》将出版[J]. 造纸信息, 1999(7): 27-28.
WANG Ju-hua. The Fiber Characteristics and Microscopic Atlas of China Paper Raw Materials Will be Published[J]. China Paper Newsletters, 1999(7): 27-28.
- [8] 闫兴伟, 崔琳, 张林, 等. 杨木制备纤维乙醇过程中化学成分变化的分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(2): 119-122.
YAN Xing-wei, CUI Lin, ZHANG Lin, et al. Analysis on Chemical Components Changes in Preparation Process of Cellulosic Ethanol from Poplar Wood[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(2): 119-122.
- [9] 李坚. 木材科学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2014: 87-89.
LI Jian. Wood Science[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2014: 87-89.
- [10] 裴继诚. 植物纤维化学[M]. 4 版. 北京: 中国轻工业出版社, 2012: 12-13.
PEI Ji-cheng. Lignocellulosic Chemistry[M]. 4th ed. Beijing: China Light Industry Press, 2012: 12-13.
- [11] 尚洁. 白桦天然种群木材化学与成浆性能的变异与遗传相关[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005: 21-22.
SHANG Jie. Variation and Genetic Correlation of Wood Chemistry and Pulping Properties of Natural Population of Betula Platyphylla[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005: 21-22.
- [12] ZHU Zhao-dong, FU Shi-yu, LAVOINE N, et al. Structural Reconstruction Strategies for the Design of Cellulose Nanomaterials and Aligned Wood Cellulose-Based Functional Materials – A Review[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116722.
- [13] 卞丽萍, 岳金权, 张国珍, 等. 不同地理种源速生白桦成浆特性[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7): 8-9.
BIAN Li-ping, YUE Jin-quan, ZHANG Guo-zhen, et al. Pulping Properties of Wood from Fast-Growing Birch Forests of Different Provenances[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(7): 8-9.
- [14] 郑丁源, 李梦扬, 张显权, 等. 橡胶木纤维素纳米纤维的制备[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 100-107.
ZHENG Ding-yuan, LI Meng-yang, ZHANG Xian-quan, et al. Preparation of Cellulose Nanofibrils from Rubber Wood[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 100-107.
- [15] 梅爱君, 徐卫南, 童再康, 等. 不同地区光皮桦木材纤维形态特征的研究[J]. 林业科技, 2017, 42(3): 20-24.
MEI Ai-jun, XU Wei-nan, TONG Zai-kang, et al. Study on Morphological Properties of Betula Luminifera Wood Fiber for Different Regions[J]. Forestry Science & Technology, 2017, 42(3): 20-24.
- [16] 刘志红, 马晓恒, 解庆. 胡桃、野核桃和胡桃楸木材解剖特征比较[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(6): 49-52.

- LIU Zhi-hong, MA Xiao-heng, XIE Qing. Wood Anatomy of *Juglans Regia*, *J. Cathayensis* and *J. Mandshurica*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(6): 49-52.
- [17] 陈兴慧, 王旋, 张耀丽. 橡木与橡胶木的鉴别[J]. 家具, 2016, 37(3): 103-105.
- CHEN Xing-hui, WANG Xuan, ZHANG Yao-li. The Identification of Oak and Rubber Wood[J]. Furniture, 2016, 37(3): 103-105.
- [18] 陈家宝, 盛佳乐, 齐文玉, 等. 黄槿木材结构特征的分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 257-260.
- CHEN Jia-bao, SHENG Jia-le, QI Wen-yu, et al. Analysis of Structure Characteristics for *Hibiscus Tiliaceus* Wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 257-260.
- [19] 王祥军, 曾仙珍, 王亚杰, 等. 橡胶树(*Hevea brasiliensis* Muell.Arg.)幼茎木材的超微结构观察[J]. 植物研究, 2018, 38(6): 876-885.
- WANG Xiang-jun, ZENG Xian-zhen, WANG Ya-jie, et al. Wood Ultrastructure Observation of Rubber Tree(*Hevea Brasiliensis* Muell. Arg.) Young Stem[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(6): 876-885.
- [20] 成俊卿. 中国木材志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 238-240.
- CHENG Jun-qing. Wood records of China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992: 238-240.

责任编辑: 彭颀