

## 14种植物的韧皮·木材·竹材和秸秆纤维制取与显微结构比较

周春长, 杜亚填\*, 彭凤珍 (吉首大学林产化工工程湖南省重点实验室, 湖南张家界 427000)

**摘要** 为了帘状锚固培养生物反应器培养床网绒所需植物纤维的筛选与制取方法的建立, 采用石灰、硫酸盐、碱性亚硫酸盐-蒽醌(AS-AQ)和酶4种纤维制取方法和光学显微观测等, 进行了14种植物的韧皮、木材、竹材、秸秆共16种材料纤维的制取、光学显微结构的比较研究。结果表明:石灰法纤维产率最高, 但耗时最长, 是其他3种方法的14倍多, 且非纤维物质、未分散束状纤维残留较高。硫酸盐法比较适合苕麻韧皮、慈竹、青皮竹、毛竹竹材和甘蔗秸秆纤维的制取; AS-AQ法比较适合小构树韧皮和木材纤维、苕麻、白杨和马尾松木材纤维、荻、小麦、水稻、玉米秸秆纤维的制取; 酶法比较适合芦竹、五节芒秸秆和马尾松木材纤维的制取。纤维细胞长度依次为韧皮纤维>竹材纤维>秸秆纤维>木材纤维, 韧皮纤维细胞不仅较长, 且壁相对较厚, 细胞较宽。植物种类以苕麻韧皮纤维细胞最长, 小构树次之, 分别为48.4、13.2 mm; 纤维细胞宽度仍以苕麻韧皮的最宽, 为38.7 mm; 纤维细胞壁宽: 秸秆(7种平均为2.3 μm)<木材(4种平均为3.9 μm)<竹材(3种平均为4.2 μm)<韧皮(2种平均为5.8 μm), 植物种类以苕麻韧皮、白杨树木材的最宽, 均为8.5 μm, 毛竹竹材纤维细胞次之, 为5.1 μm, 小构树木材、甘蔗渣纤维细胞较窄, 为4.3 μm, 其余纤维细胞壁宽均为1.1~3.1 μm。纤维细胞腔直径以苕麻韧皮的最大, 为21.7 μm, 甘蔗渣的次之, 为20.0 μm, 荻秸秆的最小, 为6.7 μm, 小构树韧皮、青皮竹、毛竹竹材、芦竹、五节芒秸秆的为15.4~17.9 μm, 其余材料的均在13.7 μm以下。上述结果可为帘状锚固培养生物反应器培养床网绒织造所需植物维管束纤维筛选提供制取方法、微观尺寸与结构方面的参考。

**关键词** 植物纤维; 制取方法; 纤维产率; 纤维细胞; 显微结构

中图分类号 Q949.94 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)16-0013-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.16.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Comparison on Microstructure of Fibers and Their Methods Made from Phloem, Wood, Bamboos and Straw of 14 Plants

ZHOU Chun-chang, DU Ya-tian, PENG Feng-zhen (Hunan Provincial Key Laboratory of Forest Products and Chemical Engineering, Jishou University, Zhangjiajie, Hunan 427000)

**Abstract** In order to establish the method of screening and making the plant fiber needed in the culture bed mesh-velvet of the curtain-anchoring culture bioreactor, comparative studies on the method of making and optical microstructure of 16 fibers from the phloem, wood, bamboo and straw of 14 plants were made by using the four methods making fiber including lime, sulfate, alkaline sulfite-anthraquinone and enzyme method and optical microscopic observation, etc. The results showed that the fiber yield was the highest by using lime method, but the time-consuming was the longest, more than 14 times of that of the other three methods, and the non fiber material residues and undispersed bundle fibers were relatively high in fibers products. The sulfate method was more suitable for *Boehmeria nivea* phloem, *Bambusa emeiensis*, *B. textilis*, *Phyllostachys heterocycla* bamboo and bagasse fiber production; the AS-AQ method was more suitable for *Broussonetia kazinoki* phloem and wood, *Boehmeria nivea*, *Populus alba* and *Pinus massoniana* wood, *Triarrhena sacchariflora*, wheat, rice and corn straw fiber production; enzyme method was more suitable for the production of *Arundo donax*, *Miscanthus floridulus* straw and *P. massoniana* wood fibers. The length of fiber cells was phloem > bamboo > straw > wood. Phloem fiber cells were not only longer, but also wall thicker and cell wider. The phloem fiber cells of *B. nivea* was the longest, which was on plant species, followed by *B. kazinoki*, 48.4 mm and 13.2 mm, respectively. The fiber cell width of *B. nivea* phloem was still the widest, 38.7 mm; fiber cell wall width was straw (7 species average 2.3 μm) < wood (4 species average 3.9 μm) < bamboo (3 species average 4.2 μm) < phloem (2 species average 5.8 μm), that of *B. nivea* phloem and *P. alba* wood were widest, 8.5 μm, respectively, which were on the species, followed by *P. heterocycla* fiber cells (5.1 μm), that of *B. kazinoki* wood and bagasse fiber cells were narrower, 4.3 μm, respectively, and the other fiber cells were between 1.1-3.1 μm. The diameter of the fiber cell lumen, *B. nivea* phloem was biggest in 16 kinds fiber cells, 21.7 μm, followed by bagasse fiber cells (20.0 μm), that of *T. sacchariflora* straw was least, 6.7 μm, that of *B. kazinoki* phloem, *B. textilis* and *P. heterocycla* wood, *A. donax* and *M. floridulus* straw were between 15.4-17.9 μm, and that of other materials were smaller more than 13.7 μm. The results provide a reference for the preparation method, micro size and structure of the plant vascular bundle fibers needed for the mesh-velvet of curtain-anchoring culture bioreactor.

**Key words** Plant fiber; Preparation method; Fiber yield; Fiber cell; Microstructure

植物纤维在植物器官中主要起机械支持和输送水分养分的作用, 有种子纤维(如棉纤维)和维管束纤维两大类, 均是一类纤维素纤维细胞<sup>[1]</sup>。工业上主要用于造纸与纺织, 传统多采用石灰法制取, 到19世纪末, 开发了硫酸盐制浆法, 极大地提高了造纸浆料的提取产率。现在又以 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 为主要组成开发了中性亚硫酸盐法和以 NaOH 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 为主要组成的碱性亚硫酸盐法, 并以此为基础添加蒽醌、甲醇、乙醇及有机酸等有机溶剂, 开发了复合有机溶剂

法, 利用微生物或酶除去原料中的木质素和果胶等非纤维素类物质提取纤维的生物制浆法等<sup>[2-5]</sup>。同时对植物原材料也进行了广泛筛选研究, 木材类植物纤维如桉树、松树、竹类、白杨系列、枝桠材类等<sup>[6-12]</sup>, 非木材类如甘蔗渣、芦苇、芒等草本植物类以及麻<sup>[13-16]</sup>、棉<sup>[17]</sup>等, 且围绕制取方法、纤维形态结构分析测定等展开了较系统的研究, 发现不同植物材料纤维的长度、宽度等形态参数以及纤维的结构特征都有着明显的差异, 且植物纤维的应用领域也在扩大, 已广泛应用于造纸、纺织、复合材料、食品等领域<sup>[1, 18]</sup>。但利用植物纤维作为植物细胞培养生物反应器支持物的相关研究鲜见报道。

该研究是基于吉首大学林产化工工程湖南省重点实验室植物细胞培养工程课题组为实现南方红豆杉(*Taxus chinensis* var. *mairii*)愈伤组织大规模培养生产紫杉醇发明的

**基金项目** 国家自然科学基金地区基金项目(31660077)。

**作者简介** 周春长(1994—), 男, 湖南永州人, 硕士, 从事药用植物组织培养生产天然产物与新型生物反应器开发研究。\*通信作者, 副教授, 硕士生导师, 从事林产资源工程研究。

**收稿日期** 2020-04-20

帘状锚固培养生物反应器及培养法所进行的。该生物反应器的工作原理是将植物愈伤组织接种到反应器的帘状培养床上,然后利用培养床的网绒纤维,将培养液渗透浸润传质给愈伤组织细胞,为愈伤组织生长提供营养和锚固支持,故培养床网绒纤维是该生物反应器的核心构造因素,要求纤维在床面能形成一定长度的绒毛和具有良好的亲水性和渗透浸润传质特性。为筛选适合培养床网绒制造的纤维,纤维的微观尺寸结构、化学组成等特性对纤维种类筛选非常关键。传统平面组织培养法采用琼脂(或植物凝胶)作为支撑植物愈伤组织细胞和传输养分的介质,养分在这种介质中的扩散程度非常有限,培养细胞一般只能吸收该介质中1~3 mm厚度的营养,故采用这种介质只能批次培养,不能进行连续培

养<sup>[19-22]</sup>,难以实现工业化生产应用。植物维管束纤维本身就是植物体内承担水分与营养物质输导的组织细胞,其化学组成与微观结构特性均与愈伤组织细胞间具有天然的生物学亲和性,故课题组将植物维管束纤维定为培养床网绒纤维筛选研究的首选。该研究采用4种纤维制取方法和14种植物的韧皮、木材、竹材、秸秆共16种材料进行纤维制取和纤维光学显微观测相关比较,以期培养床网绒纤维筛选及植物维管束纤维其他相关应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

**1.1.1 材料。**材料采集时间:2018年12月23—24日。供试材料见表1。

表1 供试材料

Table 1 Tested material

材料类型 Material type	编号 Number	植物种类 Plant species	采集地 Collection place
韧皮 Phloem	1	小构树 <i>Broussonetia kazinoki</i> S. et Z.	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
	2	苎麻 <i>Boehmeria nivea</i> (L.) Gaudich.	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
竹材 Bamboo	3	慈竹 <i>Bambusa emeiensis</i> 'viridiflavus'	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
	4	青皮竹 <i>Bambusa textilis</i> McClure	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
	5	毛竹 <i>Phyllostachys heterocycla</i> (Carr.) Mitford cv. Pubescens	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
木材 Wood	6	白杨 <i>Populus alba</i>	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
	7	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> Lamb	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
	8	小构树 <i>B. kazinoki</i> S. et Z.	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
	9	苎麻 <i>B. nivea</i> (L.) Gaudich.	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
秸秆 Stalk	10	荻 <i>Triarrhena sacchariflora</i> (Maxim.) Nakai	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
	11	芦竹 <i>Arundo donax</i>	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
	12	五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i> (Labill.) Warb. ex Schum. et L. Laut.	湖南省张家界市吉首大学张家界校区后山林
	13	甘蔗 <i>Saccharum officinarum</i>	购于张家界市
	14	小麦 <i>Triticum aestivum</i> L.	河南省安阳市(2018-05)
	15	水稻 <i>Oryza sativa</i>	湖南省永州市(2018-03)
	16	玉米 <i>Zea mays</i> Linn. sp	张家界市永定区热水坑社区

**1.1.2 试剂与设备。**果胶酶(工业酶),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;氢氧化钠、九水硫化钠、无水碳酸钠、尿素, Greagent 试剂公司;六偏磷酸钠、萘醌, Adamas 试剂公司;无水亚硫酸钠、三聚磷酸钠,天津市科密欧化学试剂有限公司;氧化钙,西陇化工股份有限公司;水玻璃(硅酸钠),天津福晨化学试剂有限公司;25%氨水,广州市番禺力强化工厂;硫酸,星空化玻有限责任公司。

SZH-11 连续变倍体视显微镜,日本奥林巴斯;BHS-113 生物显微镜,日本奥林巴斯;测微尺,DP-72 高分辨率显微摄像系统,日本尼康;HB43-S 水分测定仪,ML-204 万分之一天平,瑞士梅特勒-托利多公司;GZX-9146MBE 数显鼓风干燥器,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;数显恒温水浴锅,金坛市富华仪器有限公司;全自动立式高压蒸汽灭菌锅,厦门致微仪器有限公司;工具刀、锤子和剪刀等一般器具。

**1.2 材料预处理** 树皮:去除表层栓皮,留下内层韧皮,剪切成5~7 cm长小段,风干备用。

草本植物茎秆:切成长度为2~3 cm的小段后风干备用。

竹材和木材:切削成宽3~5 mm、长3~5 cm、厚1~2 mm

的薄片,于常温过夜备用。

### 1.3 植物纤维制取

**1.3.1 传统制取法:**石灰+机械法(图1)<sup>[2]</sup>。将经“1.2”预处理过的材料置于耐碱容器中,加入含11%(w/w)氧化钙和3%(w/w)碳酸钠碱液,浴比(植物纤维原料与浸泡所需溶液质量比)3:1,将材料充分浸没,置于35℃恒温水浴中浸泡7~8 d,取出材料,用铁锤反复锤洗5~6次,每次用滤布将“污水”过滤除去,直至水变清,静置约45 min,观察水中纤维丝分散均一、无肉眼可见纤维束出现即可。过滤收获纤维置入60℃烘箱中烘干。



图1 石灰+机械法流程

Fig.1 Lime + mechanical method process

**1.3.2 硫酸盐+机械法(图2)**<sup>[3-4,23-24]</sup>。①材料预处理:同“1.2”;②浸泡I:10%氢氧化钠、硫化度15%水溶液常温常压下浸泡15 min;③高温高压蒸煮:10%氢氧化钠、硫化度15%水溶液,外加尿素、碳酸钠、硅酸钠、复合磷酸钠(起软化材料

的作用<sup>[23]</sup>)各 0.3%,于 121 ℃、103.4 kPa 压力下蒸煮 3 h,浴比 5:1;④机械捶打松弛材料组织结构:将经过“③”处理过的材料取出用木锤捶打 3 min 左右,使原材料稍微松散,除去少量“胶质”;⑤浸泡Ⅱ:加入软化剂(2%氨水和 4%尿素以 1:30 比例混合)在 25 ℃下浸泡 1 h;⑥蒸煮:将浸泡Ⅱ料液置于 100 ℃下蒸煮 1 h,进行脱糖、脱脂、脱胶;⑦硫酸盐法蒸煮处理:将经上述处理后的材料置于 16%氢氧化钠、硫化度 16%水溶液中,再加入尿素、碳酸钠、硅酸钠、复合磷酸钠各 0.3%的辅料,浴比 5:1,于 100 ℃中处理 5 h;⑧机械捶打水洗除杂:与“1.3.1”同;⑨收获纤维烘干:与“1.3.1”同。

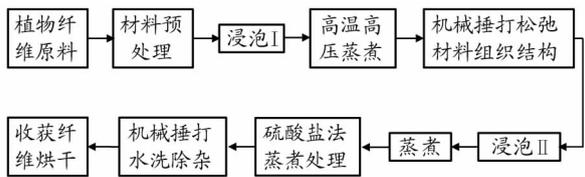


图 2 硫酸盐+机械法流程

Fig.2 Sulfate + mechanical method process

**1.3.3 碱性亚硫酸盐-蒽醌+机械法(AS-AQ法)**(图 3)<sup>[3-4,23-24]</sup>。①材料预处理:同“1.2”;②浸泡Ⅰ:6%氢氧化钠、10%亚硫酸盐溶液常温常压下浸泡 15 min;③高温高压蒸煮:经“②”处理后再加入尿素、碳酸钠、硅酸钠、复合磷酸钠各 0.3%的辅剂,浴比 5:1,于高 121 ℃、103.4 kPa 压力下蒸煮 3 h;④机械捶打松弛材料组织结构:与“1.3.2④”同;⑤浸泡Ⅱ:与“1.3.2⑤”同;⑥蒸煮:与“1.3.2⑥”同;⑦碱+蒽醌蒸煮处理:将经上述蒸煮后的材料置于含 8%氢氧化钠、15%亚硫酸盐、0.1%蒽醌水溶液中,再加入尿素、碳酸钠、硅酸钠、复合磷酸钠各 0.3%的辅剂,于 100 ℃中处理 5 h;⑧机械捶打水洗除杂:与“1.3.1③”同;⑨纤维浆烘干:与“1.3.1④”同。

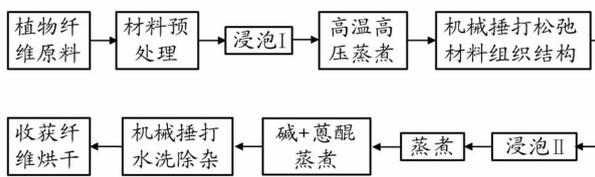


图 3 AS-AQ 法流程

Fig.3 AS-AQ method process

**1.3.4 生物酶-化学+机械法**(图 4)<sup>[15]</sup>。①材料预处理:同“1.2”;②水煮:将材料加水浸泡后,沸水煮 10 min,取出;③与“1.3.2④”同;④酸浸处理:用 1.5 g/L 硫酸溶液,温度 60 ℃下浸泡处理 1 h,浴比为 1:15;⑤碱中和:用 2.5 g/L 氢氧化钠水溶液常温常压处理 0.5 h;⑥中性果胶酶处理:准确称取 0.1 g 30 000 U/g 工业果胶酶,用 50 ℃超纯水定容于 300 mL,制成 10 U/mL 果胶酶溶液,于常温常压, pH=7.0,按浴比 1:20 加入材料中,处理 3.5 h;⑦碱煮:倒去酶溶液,按浴比 1:15 加入 15 g/L 氢氧化钠(每 1 000 mL 氢氧化钠溶液中分别加入 30~50 g 三聚磷酸钠与 30~80 g 硅酸钠)溶液,于 100 ℃,常压处理 2 h;⑧机械捶打水洗除杂:与“1.3.1③”同;⑨收获纤维烘干:与“1.3.1④”同。

**1.4 产率计算** 将预处理后的纤维原材料取试验部分在天

平上测定其质量,记为  $G_m$ ,同时对材料进行含水量测定,记作  $C_m$ ,以此计算出材料干重,记为  $G_m \times (1 - C_m)$ ;在原材料提取纤维之后,用天平称出提取的植物纤维质量,记为  $G_n$ ,取出一部分测定其含水量,记为  $C_n$ ,得出提取的植物纤维干重是  $G_n \times (1 - C_n)$ 。制浆工艺得到的纤维,其产率的计算公式如下:

$$K = \frac{G_n \times (1 - C_n)}{G_m \times (1 - C_m)}$$

式中,  $K$  为纤维产率(%);  $G_n$  为纤维质量(g);  $C_n$  为纤维含水量(%);  $G_m$  为制取纤维的原材料质量(g);  $C_m$  为纤维原材料的含水量(%)。

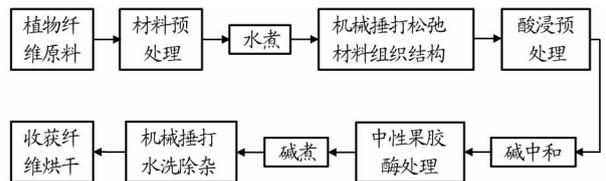


图 4 生物酶-化学+机械法流程

Fig.4 Biological enzyme-chemical + mechanical method process

**1.5 植物纤维显微结构观测** 将制取的分散性很好的纤维置于玻片上,加纯净水滴,用棒将纤维捣散,使纤维丝均匀分散不堆积,盖上盖玻片,然后用奥林巴斯 BHS-113 显微镜对纤维进行显微形态结构观测,拍照记录其显微形态结构和相关微观尺寸。

**1.6 植物纤维横截面显微结构观测** 将制取的分散性很好的植物纤维捋成整齐的一束,用平滑钢板夹紧,切除伸出的不整齐部分,然后用刀片徒手反复切削,将切下的纤维碎末用湿润玻璃棒粘取,用蒸馏水滴洗于载玻片上,待其充分吸水后用玻璃棒将纤维碎末分散涂布均匀,然后盖上盖玻片,用奥林巴斯 BHS-113 显微镜进行观测,在视野中寻找可清晰观测到纤维横切面的材料,拍照记录其显微形态结构和微观尺寸。

## 2 结果与分析

**2.1 不同制取方法纤维产率的比较** 从表 2 可以看出,石灰法制取纤维产率最高,且木材纤维产率较韧皮、秸秆、竹材纤维产率高,白杨树木材纤维产率最高为 95.02%,随后依次为慈竹、青皮竹、毛竹竹材、马尾松木材,产率基本都在 70% 以上。硫酸盐法以小构树木材纤维产率最高,为 71.47%,小构树韧皮最低,为 29.03%。AS-AQ 法以白杨树木材纤维最高,为 69.85%,甘蔗渣最低,为 25.13%。酶法以马尾松最高,为 79.36%,韧皮纤维产率相对较低,其中小构树的最低,为 28.47%,可能是韧皮组织中果胶含量较其他材料高,经果胶酶处理后质量损失较大所致。4 种方法白杨树木材纤维产率均在 60% 以上。

**2.2 不同制取方法纤维质量的比较** 根据所制取纤维观特征(图 5),石灰法制取的纤维相对较粗糙,非纤维物质和未分散纤维束残留较高;硫酸盐法、AS-AQ 法和酶法提取的纤维分散性好,非纤维物质残留少。综合分析,石灰法所制取纤维质量较差,不宜应用于帘状锚固培养床网绒的纺织。

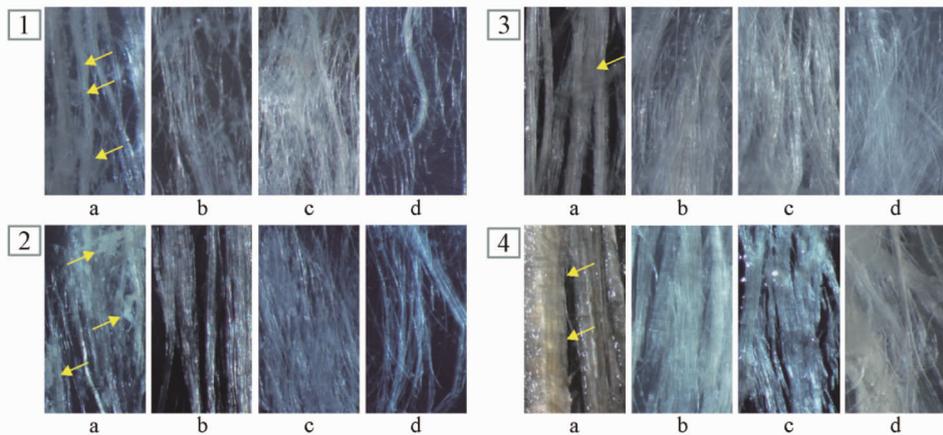
表2 14种植物的4类材料采用4种方法制取的纤维产率

Table 2 The fiber productivity of 4 kinds of materials from 14 plants obtained by four methods

植物种类 Plant species	纤维类型 Fiber type	纤维产率 Fiber productivity // %			
		石灰法 Lime method	硫酸盐法 Sulfate method	AS-AQ法 AS-AQ method	酶法 Enzymic method
小构树 <i>B.kazinoki</i>	韧皮纤维	57.44	29.03	33.21	28.47
	木材纤维	77.90	71.47	37.07	68.13
苧麻 <i>B.nivea</i>	韧皮纤维	49.21	50.65	45.19	41.95
	木材纤维	91.86	60.92	61.92	58.65
慈竹 <i>B.emeiensis</i>	竹材纤维	89.90	55.76	53.25	51.43
青皮竹 <i>B.textilis</i>	竹材纤维	70.13	63.54	51.80	55.61
毛竹 <i>P.heterocycla</i>	竹材纤维	90.34	54.64	54.07	50.59
白杨 <i>P.alba</i>	木材纤维	95.02	68.10	69.85	67.02
马尾松 <i>P.massoniana</i>	木材纤维	85.58	63.98	57.26	79.36
荻 <i>T.sacchariflora</i>	秸秆纤维	79.75	52.72	58.78	53.21
芦竹 <i>A.donax</i>	秸秆纤维	64.33	42.36	44.80	45.01
五节芒 <i>M.floridulus</i>	秸秆纤维	71.54	50.50	53.42	53.60
甘蔗 <i>S.officinarum</i>	秸秆纤维	48.81	45.63	25.13	37.66
小麦 <i>T.aestivum</i>	秸秆纤维	75.09	52.27	60.53	46.32
水稻 <i>O.sativa</i>	秸秆纤维	47.23	42.17	46.54	37.32
玉米 <i>Z.mays</i>	秸秆纤维	74.84	42.12	53.75	39.78

综合各因素,苧麻韧皮部,慈竹、青皮竹、毛竹和甘蔗渣纤维制取采用硫酸盐法为好,纤维分散程度高,非纤维物质残留少;小构树韧皮,白杨、马尾松、苧麻木材,荻、小麦、水稻、玉米秸秆纤维采用 AS-AQ 法制取,纤维产率、纤维分散程度均

较高,非纤维物质残留少;小构树木材采用 AS-AQ 法较其他方法好;白杨树木材、芦竹、五节芒秸秆采用除石灰法以外的3种方法制取,差异不大,均较适合;马尾松木材采用酶法较其他方法好,纤维产率相对较高,质量好。



注:1.小构树韧皮纤维,2.小麦秸秆纤维,3.青皮竹纤维,4.苧麻木纤维;a.石灰法,b.酶法,c.硫酸盐法,d.AS-AQ法

Note: 1. *B. kazinoki* phloem fiber, 2. Stalk fiber of wheat, 3. *B. textilis* fiber, 4. *B. nivea* wood fiber; a. Lime method, b. Enzymic method, c. Sulfate method, d. AS-AQ method

图5 4种纤维制取方法所制取纤维质量比较(125×)

Fig.5 Comparisons of fiber quality prepared by four fiber preparation methods(125×)

**2.3 不同制取方法所需制取时间的比较** 16种植物材料分别采用4种方法进行纤维制取,硫酸盐法、AS-AQ法和酶法制取的纤维不仅质量较石灰法好(图5),且制取所需时间远远少于石灰法(表3),3种方法制取所需时长分别为18、18、14h,仅为石灰法192h的1/14左右(表3),但3种方法均使用了软化水解辅助剂,可能会导致生产成本较石灰法略高,若投入生产,需进行过程经济学研究作综合评价比较。

**2.4 16种植物纤维微观尺寸与结构间的比较** 根据光学显微镜观测(图6、7),材料类型间和植物种类间比较发现,韧皮纤维细胞长度最长,依次为韧皮>竹材>秸秆>木材,小构树、

苧麻韧皮纤维细胞长度分别是13.2、48.4mm,是竹材类纤维的6~10倍,是秸秆和木材类纤维细胞长度的10余倍;苧麻木材纤维细胞最短,为0.7mm;水稻秸秆纤维细胞与木材纤维细胞相接近,为0.8mm,其他秸秆纤维细胞长度均为木材纤维细胞长度的1倍多。纤维细胞长宽比以韧皮的最高,小构树为602:1,苧麻1251:1,竹材纤维细胞和野生草本植物秸秆纤维细胞次之,为100~200,农作物草本植物秸秆纤维细胞较野生草本植物低,木材纤维最小,不到100。纤维细胞壁宽:秸秆(7种平均为2.3 $\mu\text{m}$ )<木材(4种平均为3.9 $\mu\text{m}$ )<竹材(3种平均为4.2 $\mu\text{m}$ )<韧皮(2种平均为5.8 $\mu\text{m}$ ),即草

本植物秸秆的纤维细胞相对较细。

表 3 不同制取方法所需投料量和时间

Table 3 Feeding volume and time required by different preparation methods

制取方法 Preparing methods	投料量 Feeding volumn		耗时 Time-consuming h
	纤维原材料干重 Dry weight of fiber raw materials//g	制取周期试剂及试剂用量占原材料比重 Preparation of periodic reagents and the proportion of reagents to raw materials	
石灰法 Lime method	小构树树皮 3.53, 苕麻树皮 1.74; 慈竹竹材 8.32, 青皮竹竹材 4.79, 毛竹竹材 4.92; 白杨树木材 3.58, 马尾松木材 4.26, 小构树木材 5.78, 苕麻木材 4.58; 荻秸秆 7.50, 芦竹秸秆 8.01, 五节芒秸秆 9.22, 甘蔗渣 4.53, 小麦秸秆 3.62, 水稻秸秆 5.59, 玉米秸秆 2.18	氧化钙 11%, 碳酸钠 3%	192
硫酸盐法 Sulfate method	小构树树皮 4.19, 苕麻树皮 2.63; 慈竹竹材 13.32, 青皮竹竹材 12.86, 毛竹竹材 9.53; 白杨树木材 9.55, 马尾松木材 11.61, 小构树木材 8.39, 苕麻木材 9.24; 荻秸秆 11.55, 芦竹秸秆 11.81, 五节芒秸秆 14.45, 甘蔗渣 7.13, 小麦秸秆 4.83, 水稻秸秆 7.30, 玉米秸秆 2.14	氢氧化钠 26%, 硫化度/硫化钠 31%, 软化剂(2%氨水和 4%尿素, 1:30 比例混合), 辅料试剂(尿素、碳酸钠、硅酸钠、复合磷酸钠)0.6%	18
AS-AQ 法 AS-AQ method	小构树树皮 5.02, 苕麻树皮 2.22; 慈竹竹材 10.34, 青皮竹竹材 8.61, 毛竹竹材 11.62; 白杨树木材 5.97, 马尾松木材 8.66, 小构树木材 6.38, 苕麻木材 6.98, 荻秸秆 11.99, 芦竹秸秆 10.13, 五节芒秸秆 14.54, 甘蔗渣 4.90, 小麦秸秆 4.50, 水稻秸秆 7.58, 玉米秸秆 2.74	氢氧化钠 14%, 亚硫酸盐 25%, 萘醌 0.1%, 软化剂(2%氨水 4%尿素, 1:30 比例混合), 辅料试剂 0.6%	18
酶法 Enzymic method	小构树树皮 16.34, 苕麻树皮 17.69; 慈竹竹材 21.43, 青皮竹竹材 13.80, 毛竹竹材 16.20; 白杨树木材 9.27, 马尾松木材 19.21, 小构树木材 17.68, 苕麻木材 15.99; 荻 19.43, 五节芒 22.70, 芦竹 24.40, 甘蔗渣 10.18, 小麦秸秆 9.01, 水稻秸秆 15.93, 玉米秸秆 9.83	硫酸 1.5 g/L, 氢氧化钠 17.5 g/L, 果胶酶 10 U/mL, 三聚磷酸钠 40 g/L, 硅酸钠 55 g/L	14

纤维细胞的微观形态(图 6、7), 有丝状、梭状和带状等, 横切面呈近圆形、近椭圆形、不规则方形等, 细胞多具中空, 腔壁有不同程度与类型加厚等。

小构树树皮纤维细胞(图 6a、7a)长度为 9.5~16.3 mm, 平均长度为 13.2 mm, 宽度为 16.4~23.3  $\mu\text{m}$ , 平均宽度为 21.9  $\mu\text{m}$ , 平均长宽比为 602:1, 壁宽为 3.1  $\mu\text{m}$ , 中空腔直径为 15.7  $\mu\text{m}$ , 壁腔比为 0.20。纤维细胞横切面近圆形, 中空近圆形, 腔壁外较光滑。细胞近圆筒状, 壁具有间距不等分散不规则环状加厚。

苕麻树皮纤维细胞(图 6b、7b)长度为 31.5~51.3 mm, 平均长度为 48.4 mm, 宽度为 31.8~46.3  $\mu\text{m}$ , 平均宽度为 38.7  $\mu\text{m}$ , 平均长宽比为 1 251:1, 壁宽为 8.5  $\mu\text{m}$ , 中空腔直径为 21.7  $\mu\text{m}$ , 壁腔比为 0.39。纤维细胞横切面近方形或不规则多边形, 中空近圆形或椭圆形, 腔内具筛网状结构, 腔壁明显加厚。细胞近带状, 胞壁具不均匀密集环状加厚, 细胞纵向呈平波状弯曲。

慈竹竹材纤维细胞(图 6c、7c)长度为 2.7~4.0 mm, 平均长度为 3.3 mm, 宽度为 13.6~24.3  $\mu\text{m}$ , 平均宽度为 17.1  $\mu\text{m}$ , 平均长宽比为 194:1, 壁宽为 4.8  $\mu\text{m}$ , 中空腔直径为 7.5  $\mu\text{m}$ , 壁腔比为 0.64。纤维细胞横切面扁平近长方形, 中空中空近长方形, 内具筛网状结构, 腔壁外有明显的加厚凸起。细胞类带状, 末端渐细, 细胞壁表面具间距不均点状凸起和竹节状环状加厚。

青皮竹竹材纤维细胞(图 6d、7d)长度为 2.3~3.0 mm, 平均长度为 2.8 mm, 宽度为 16.3~27.6  $\mu\text{m}$ , 平均宽度为 21.8  $\mu\text{m}$ , 平均长宽比为 126:1, 壁宽为 2.6  $\mu\text{m}$ , 中空腔直径为 16.6  $\mu\text{m}$ , 壁腔比为 0.16。纤维细胞横切面见双细胞紧密结合状, 2 个细胞近半圆形, 中空中空近半圆形, 内壁面有皱褶, 中空外壁较光滑。细胞近半圆带状, 胞壁具稀疏环状加厚和纵向较密集条纹状加厚, 外壁无凸起。

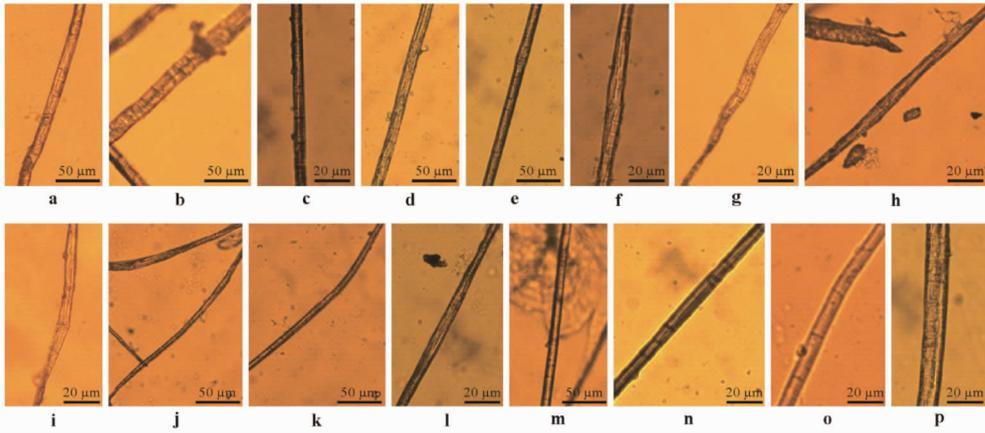
毛竹竹材纤维细胞(图 6e、7e)长度为 2.4~3.9 mm, 平均长度为 3.2 mm, 宽度为 14.8~30.9  $\mu\text{m}$ , 平均宽度为 25.6  $\mu\text{m}$ , 平均长宽比为 124:1, 壁宽为 5.1  $\mu\text{m}$ , 中空腔直径为 15.4  $\mu\text{m}$ , 壁腔比为 0.33。纤维细胞横切面近长方形, 中空中空近椭圆形, 具筛网状结构, 胞壁较厚。细胞形状如竹, 但末端渐细, 外壁面较光滑, 胞壁具明显间距不等环状加厚。

白杨树木材纤维细胞(图 6f、7f)长度为 0.5~1.2 mm, 平均长度为 0.8 mm, 宽度为 19.4~33.6  $\mu\text{m}$ , 平均宽度为 28.3  $\mu\text{m}$ , 平均长宽比为 29:1, 壁宽为 8.5  $\mu\text{m}$ , 中空腔直径为 11.3  $\mu\text{m}$ , 壁腔比为 0.75。纤维细胞横切面为椭圆形, 中空中空呈椭圆形。细胞两端渐细近梭形, 胞壁具密集梭形条带状和间距不等较密集环状加厚。

马尾松木材纤维细胞(图 6g、7g)长度为 0.6~1.0 mm, 平均长度为 0.8 mm, 宽度为 8.6~18.4  $\mu\text{m}$ , 平均宽度为 12.2  $\mu\text{m}$ , 平均长宽比为 62:1, 壁宽为 1.6  $\mu\text{m}$ , 中空腔直径为 8.9  $\mu\text{m}$ , 壁腔比为 0.18。纤维细胞横切面近椭圆形, 中空中空近圆形或棱形, 内具筛网状结构。细胞两端渐尖近梭形, 胞壁纵向具密集条纹状加厚, 横向具稀疏环状加厚。

小构树木材纤维细胞(图 6h、7h)长度为 0.6~1.1 mm, 平均长度为 0.8 mm, 宽度为 15.4~23.8  $\mu\text{m}$ , 平均宽度为 19.2  $\mu\text{m}$ , 平均长宽比为 41:1, 壁宽为 4.3  $\mu\text{m}$ , 中空腔直径为 10.6  $\mu\text{m}$ , 壁腔比为 0.41。纤维细胞横切面近四边形, 中空中空, 近长方形。细胞近梭形, 胞壁纵向具不规则条带状加厚, 横向具间距不等环状加厚。

苕麻木材纤维细胞(图 6i、7i)长度为 0.5~1.1 mm, 平均长度为 0.7 mm, 宽度为 8.5~13.3  $\mu\text{m}$ , 平均宽度为 10.4  $\mu\text{m}$ , 平均长宽比为 66:1, 壁宽为 1.3  $\mu\text{m}$ , 中空腔直径为 7.8  $\mu\text{m}$ , 壁腔比为 0.17。纤维细胞横切面近椭圆形, 不规则, 中空中空近圆形, 不规则。细胞纵向如竹鞭, 两端渐尖, 胞壁纵向具条纹状加厚, 横向具间距不等环状加厚, 加厚处外凸如竹节。

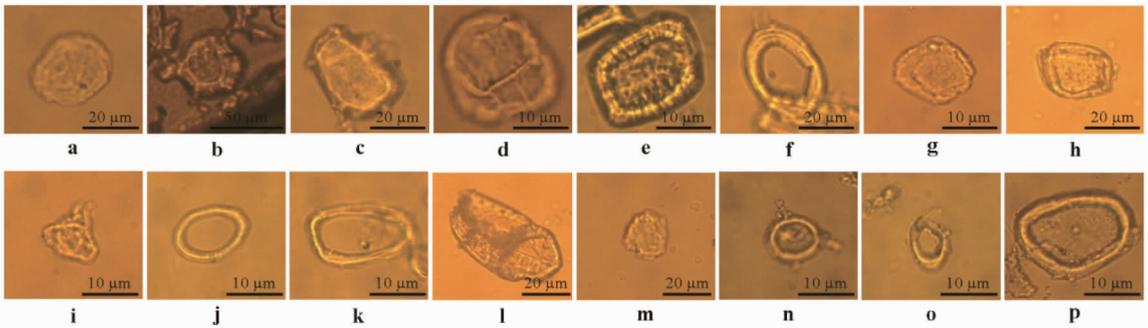


注:韧皮纤维:a.小构树,b.苎麻;竹纤维:c.慈竹,d.青皮竹,e.毛竹;木纤维:f.白杨,g.马尾松,h.小构树茎秆,i.苎麻茎秆;草本植物秸秆纤维(野生):j.荻,k.芦竹,l.五节芒;草本植物秸秆纤维(农作物):m.甘蔗渣,n.小麦,o.水稻,p.玉米

Note: Phloem fiber: a. *B. kazinoki*, b. *B. nivea*; Bamboo fiber: c. *B. emeiensis*, d. *B. textilis*, e. *P. heterocycla*; Wood fiber: f. *P. alba*, g. *P. massoniana*, h. *B. kazinoki* stem, i. *B. nivea* stem; Stalk fibers of herbaceous plants (wild): j. *T. sacchariflora*, k. *A. donax*, l. *M. floridulus*; Stalk fibers of herbaceous plants (crop): m. Bagasse, n. *T. aestivum*, o. *O. sativa*, p. *Z. mays*

图6 植物纤维细胞显微照片(物20×摄125)

Fig.6 Plant fiber cell micrograph (20×125)



注:韧皮纤维:a.小构树,b.苎麻;竹纤维:c.慈竹,d.青皮竹,e.毛竹;木纤维:f.白杨,g.马尾松,h.小构树茎秆,i.苎麻茎秆;草本植物秸秆纤维(野生):j.荻,k.芦竹,l.五节芒;草本植物秸秆纤维(农作物):m.甘蔗渣,n.小麦,o.水稻,p.玉米

Note: Phloem fiber: a. *B. kazinoki*, b. *B. nivea*; Bamboo fiber: c. *B. emeiensis*, d. *B. textilis*, e. *P. heterocycla*; Wood fiber: f. *P. alba*, g. *P. massoniana*, h. *B. kazinoki* stem, i. *B. nivea* stem; Stalk fibers of herbaceous plants (wild): j. *T. sacchariflora*, k. *A. donax*, l. *M. floridulus*; Stalk fibers of herbaceous plants (crop): m. Bagasse, n. *T. aestivum*, o. *O. sativa*, p. *Z. mays*

图7 植物纤维横切面显微照片(物40×摄125)

Fig.7 Plant fiber transverse section micrograph (40×125)

荻秸秆纤维细胞(图6j、7j)长度为1.4~3.5 mm,平均长度为2.3 mm,宽度为8.1~13.4  $\mu\text{m}$ ,平均宽度为11.3  $\mu\text{m}$ ,平均长宽比为200:1,壁宽为2.3  $\mu\text{m}$ ,中空腔直径为6.7  $\mu\text{m}$ ,壁腔比为0.34。纤维细胞横切面近圆形或椭圆形,中空中空近椭圆形,内空光滑。细胞两端渐细,胞壁具环状或螺旋状加厚,胞壁外表光滑。

芦竹秸秆纤维细胞(图6k、7k)长度为2.6~4.0 mm,平均长度为3.4 mm,宽度为17.1~25.4  $\mu\text{m}$ ,平均宽度为20.3  $\mu\text{m}$ ,平均长宽比为168:1,壁宽为1.2  $\mu\text{m}$ ,中空腔直径为17.9  $\mu\text{m}$ ,壁腔比为0.07。纤维细胞横切面近椭圆形,中空中空,近椭圆形。细胞条带状,胞壁面光滑,具稀疏纹孔状和环状加厚,不外凸。

五节芒秸秆纤维细胞(图6l、7l)长度为2.2~3.3 mm,平均长度为2.7 mm,宽度为16.9~25.4  $\mu\text{m}$ ,平均宽度为

20.3  $\mu\text{m}$ ,平均长宽比为135:1,壁宽为1.7  $\mu\text{m}$ ,中空腔直径为16.9  $\mu\text{m}$ ,壁腔比为0.10。纤维细胞横切面近长椭圆形,中空中空近椭圆形,壁外表面光滑。细胞呈宽窄不一的扁平带状,至两端渐细,胞壁面光滑,具间隔不均匀环状加厚和纵向梭状条纹加厚。

甘蔗渣纤维细胞(图6m、7m)长度为1.5~2.2 mm,平均长度为2.0 mm,宽度为23.6~31.7  $\mu\text{m}$ ,平均宽度为28.6  $\mu\text{m}$ ,平均长宽比为68:1,壁宽为4.3  $\mu\text{m}$ ,中空腔直径为20.0  $\mu\text{m}$ ,壁腔比为0.21。纤维细胞横切面近圆形至椭圆形,中空中空呈不规则多边形。细胞平直近丝状,表面光滑,具稀疏间距不等的环状加厚,加厚部不外凸。

小麦秸秆纤维细胞(图6n、7n)长度为1.4~1.9 mm,平均长度为1.6 mm,宽度为9.1~13.3  $\mu\text{m}$ ,平均宽度为11.1  $\mu\text{m}$ ,平均长宽比为145:1,壁宽为1.1  $\mu\text{m}$ ,中空腔直径为8.9  $\mu\text{m}$ ,壁

腔比为 0.12。纤维细胞横切面近圆形,中腔中空,近圆形。细胞直近丝状,胞壁具稀疏不等距环状加厚,加厚部微外凸。

水稻秸秆纤维(图 6o、7o)长度为 0.7~1.0 mm,平均长度为 0.8 mm,宽度为 11.6~16.7  $\mu\text{m}$ ,平均宽度为 13.0  $\mu\text{m}$ ,平均长宽比为 65:1,壁宽为 2.5  $\mu\text{m}$ ,中空腔直径为 8.0  $\mu\text{m}$ ,壁腔比为 0.31。纤维细胞横切面近圆形,中腔中空,近圆形。细胞平直近丝状,胞壁表面光滑,具近等距稀疏环状加厚,加厚部不外凸。

玉米秸秆纤维细胞(图 6p、7p)长度为 1.1~2.2 mm,平均长度为 1.9 mm,宽度为 15.4~23.6  $\mu\text{m}$ ,平均宽度为 19.7  $\mu\text{m}$ ,平均长宽比为 93:1,壁宽为 3.0  $\mu\text{m}$ ,中空腔直径为 13.7  $\mu\text{m}$ ,壁腔比为 0.22。纤维细胞横切面近椭圆形,中腔中空,近椭圆形,具网纹状结构。细胞近丝状,胞壁具较密集不等距环状加厚,加厚部不外凸。

### 3 结论

4 种制取方法比较,石灰法制取的纤维产率最高,但耗时最长,纤维中非纤维物质与束状纤维残留较高,硫酸盐、碱性亚硫酸盐-蒽醌和酶法的纤维产率虽较石灰法低,但所制取纤维中束状纤维与非纤维物质残留低,耗时短,仅为石灰法的约 1/14。若考虑应用生产,还需根据纤维产率、质量、材料等因素进行深度优化研究。

16 种植物的植物维管束纤维显微观测结果表明,按材料类型,纤维细胞长度依次为韧皮纤维>竹材纤维>秸秆纤维>木材纤维,韧皮纤维细胞不仅较长,且壁相对较厚,细胞较宽。按植物种类,苧麻韧皮纤维细胞最长,小构树次之,分别为 48.4 mm、13.2 mm,是竹材纤维细胞(2.8~3.3 mm)的 4~17 倍,是秸秆纤维细胞和木材纤维细胞的 10~20 倍;纤维细胞宽度仍以苧麻韧皮最宽,为 38.7 mm,是竹材纤维细胞(17.1~25.6 mm)、木材纤维细胞(10.4~28.3 mm)及秸秆纤维细胞(11.1~28.6 mm)的 1.5 倍以上;纤维细胞壁宽以苧麻韧皮、白杨树木材的最宽,均为 8.5  $\mu\text{m}$ ,毛竹竹材纤维细胞次之,为 5.1  $\mu\text{m}$ ,小构树木材、甘蔗渣纤维细胞较窄,为 4.3  $\mu\text{m}$ ,其余纤维细胞壁宽均为 1.1~3.1  $\mu\text{m}$ 。纤维细胞腔直径以苧麻韧皮的最大,为 21.7  $\mu\text{m}$ ,甘蔗渣的次之,为 20.0  $\mu\text{m}$ ,获秸秆的最小,为 6.7  $\mu\text{m}$ ,小构树韧皮、青皮竹、毛竹竹材、芦竹、五节芒秸秆的为 15.4~17.9  $\mu\text{m}$ ,其余材料的均为 13.7  $\mu\text{m}$  以下。所获得 14 种植物 4 个材料类型的纤维细胞的微观尺寸与结构特性,还只能为所述帘状锚固培养生物反应器培养床网绒

纤维筛选提供参考,至于何种特性最为适合,还需通过培养床应用验证才可确定。

### 参考文献

- [1] 甘小洪.毛竹茎秆纤维细胞的发育生物学研究[D].南京:南京林业大学,2005.
- [2] 郭凤翔,孙和祿.浅谈石灰法制浆[J].黑龙江造纸,1999(2):27-28.
- [3] 丁字娟,周景辉.非木材纤维原料的各种制浆方法[J].国际造纸,2009,28(2):11-18.
- [4] 梁军凤,刘宗瑜.制浆方法概述[J].湖北造纸,2011(1):6-9.
- [5] 白延坤,刘秉钺,何连芳.韧皮纤维生物脱胶制浆的研究及发展[J].中国造纸学报,2006,21(3):88-92.
- [6] 赵建,李雪芝,康从宝,等.桉木 RDH 硫酸盐法制浆性能的研究[J].中国造纸学报,2002,17(1):14-20.
- [7] 卢翠香,刘媛,任世奇,等.邓恩按木材纤维形态特征及其变异[J].广西林业科学,2016,45(4):352-358.
- [8] 李新平,马彩霞.马尾松预水解硫酸盐法制人造纤维浆粕工艺的研究[J].纤维素科学与技术,2009,17(1):29-34.
- [9] 蒋建新,杨中开,朱利伟,等.竹纤维结构及其性能研究[J].北京林业大学学报,2008,30(1):128-132.
- [10] 齐锦秋,池冰,谢九龙,等.慈竹纤维形态及组织比量的研究[J].中国造纸学报,2013,28(3):1-4.
- [11] 陈柳哗,史小娟,樊军锋.秦白杨系列品种木材材性及纤维形态的研究[J].西北林学院学报,2017,32(1):253-258.
- [12] 郭正,李玉秀,雷亚芳.桑枝、杜仲条、柳条与重组材常用原料纤维形态和基本密度比较研究[J].西北林学院学报,2017,32(5):202-207.
- [13] 张峰松.甘蔗渣的纤维结构形态对浆粕反应性能影响的探讨[J].人造纤维,2015,45(6):2-4.
- [14] DANSO H.Properties of coconut, oil palm and bagasse fibres: As potential building materials[J].Procedia engineering, 2017, 200:1-9.
- [15] 周红涛,刘华,周彬.构树纤维的提取与性能研究[J].上海纺织科技, 2013, 41(8):16-17, 39.
- [16] 晏春耕,曹瑞芳,申素芳,等.苧麻韧皮纤维超微结构的观察[J].安徽农业科学,2012,40(8):4488-4489, 4491.
- [17] 吴刚.棉秆纤维形态结构及其变化规律的研究[D].长沙:湖南农业大学,2009.
- [18] MOREIRA L R S, FILHO E X F. An overview of mannan structure and mannan-degrading enzyme systems[J]. Applied microbiology & biotechnology, 2008, 79(2):165-178.
- [19] LUCYSZY N, QUOIRIN M, KOEHLER H S, et al. Agar/galactomannan blends for strawberry (*Fragaria x ananassa* Duchesne) cv. Pelican micro-propagation[J]. Scientia horticulturae, 2006, 107(4):358-364.
- [20] SCHOLTEN H J, PIERIK R L M. Agar as a gelling agent: Differential biological effects in vitro[J]. Scientia horticulturae, 1998, 77(1/2):109-116.
- [21] LEE T J, ZOBAYED S M A, FIRMANI F, et al. A novel automated transplanting system for plant tissue culture[J]. Biosystems engineering, 2019, 181:63-72.
- [22] BHATIA S, SHARMA K, DAHIYA R, et al. Modern applications of plant biotechnology in pharmaceutical sciences[M]. Massachusetts: Academic Press, 2015:31-107.
- [23] 张黎云,张一粟,张剑锋,等.麻纤维的制备方法及其用途:CN03157445.9[P].2004-09-08.
- [24] 余家鸾.化学浆几种蒸煮方法的特点及机理[J].广东造纸,1999(Z1):24-29.