

2011, 37(6): 1067-1072  
 ISSN 0257-4799; CN 32-1115/S  
 E-mail: CYKE@chinajournal.net.cn

## 桑枝皮纤维脱胶废液中的可利用组分分离与回收

储诚灿 刘琳 姚菊明

(浙江理工大学材料与纺织学院, 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室 杭州 310018)

**摘要** 桑枝皮纤维制备过程中会产生大量含半纤维素、果胶和木质素等有机成分的废水。以桑枝皮纤维脱胶废液为原料, 研究从脱胶废液中高效分离回收半纤维素、果胶和木质素等可利用组分的工艺, 并对回收样品的化学结构进行表征。结果表明, 调节废液 pH 值为 4.5、脱胶废液与 95% 乙醇的体积比为 1:2 时, 可使半纤维素和果胶组分沉淀析出, 进一步加入 50 g/L CaCl<sub>2</sub> 溶液沉析使二者有效分离, 2 种组分的得率分别为 15.90% 和 29.41%。同时脱胶废液分离上清中的木质素也得到最大程度回收, 其得率为 18.75%。傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析表明, 回收得到的半纤维素和木质素样品的主要成分分别为 4-甲氧基葡萄糖醛酸聚木糖、愈创木基或紫丁香基木质素, 而果胶样品为高纯度低酯果胶。3 种组分分离回收后脱胶废液中总有机碳 (TOC)、化学需氧量 (COD)、悬浮物 (SS) 的去除率分别达到 93.5%、93.5% 和 100%。研究结果显示, 采用该回收工艺能使桑枝皮纤维脱胶废液中的各种可利用组分得到有效分离, 可实现桑枝皮纤维的清洁化生产和资源高效利用。

**关键词** 桑枝皮纤维脱胶废液; 半纤维素; 果胶; 木质素; 回收工艺

中图分类号 S886.9 文献标识码 B 文章编号 0257-4799(2011)06-1067-06

## Isolation and Recovery of Utilizable Components in Degumming Waste Liquid of Mulberry Bark Fibers

CHU Cheng-Can LIU Lin YAO Ju-Ming\*

(Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, College of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract** A large amount of wastewater containing organic components, including hemicellulose, pectin and lignin, is produced during the preparation of fibers from mulberry barks. In present study, the degumming waste liquid of mulberry bark fibers was used as the raw material to investigate the technology for efficiently isolating and recovering hemicellulose, pectin, lignin and other utilizable components and to characterize chemical structures of the recovered samples. The results showed that pH 4.5 of the waste liquid and volume ratio 1:2 of degumming waste liquid to 95% ethanol could lead to the precipitation of hemicellulose and pectin. And further addition of 50 g/L CaCl<sub>2</sub> led to effective separation of the two components, with recovery yield of 15.90% and 29.41% respectively. Meanwhile, lignin in the supernatant of degumming waste liquid was also recovered to the highest extent, with a recovery yield of 18.75%. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analyses revealed that the main components of recovered hemicellulose and lignin samples were 4-methoxy-glucuronic acid xylans, guajacyl lignin or syringyl lignin, while the obtained pectin sample was highly purified low-methoxy pectin. Moreover, the removal efficiency of total organic carbon (TOC), chemical oxygen demand (COD) and suspended substance (SS) in the degumming waste liquid was 93.5%, 93.5% and 100%, respectively. These results indicate that using this recovery technology can effectively separate various utilizable components in de-

收稿日期: 2011-06-22 接受日期: 2011-08-04  
 资助项目: 新世纪优秀人才支持计划项目 (No. NCET070763)。  
 作者简介: 储诚灿 (1990-) 男, 安徽, 本科生。  
 通信作者: 姚菊明, 教授, 博士生导师。  
 Tel: 0571-86843618, E-mail: yaoj@zstu.edu.cn

gumming waste liquid of mulberry bark fibers, making it realizable to have clean production of mulberry bark fibers and efficient use of resources.

**Key words** Degumming waste liquid of mulberry bark fibers; Hemicellulose; Pectin; Lignin; Recycling process

近年来,桑树学科的研究已经突破了传统栽桑养蚕的利用模式,充分利用桑树资源的物质潜能和生物潜能,研发医药、食品、化工及动物养殖等领域的产品成为热点<sup>[1-2]</sup>,呈现出桑树多元化利用的新格局。桑枝皮纤维同棉麻纤维相似,具有优良的吸湿、透气性,且光泽良好,手感柔软,易于染色,是一种纯天然的绿色纺织纤维<sup>[3-6]</sup>。因此,在世界能源日趋匮乏和纺织原材料价格不断上涨的今天,这种新型纤维的开发利用具有十分广阔的前景。桑枝皮纤维的制取目前主要是采用二次碱煮的化学脱胶工艺,每制备1 t桑枝皮纤维需要消耗1.3 t氢氧化钠、0.6 t化学助剂和66.7 t淡水。由此在制取过程中会产生大量废液,且在脱胶过程中,桑枝皮中质量分数超过50%的半纤维素、果胶和木质素等功能性组分却未能有效回收利用,往往是随脱胶废液直接排入周围环境中,造成了严重的环境污染和资源浪费。

桑枝皮中含量丰富的半纤维素、果胶、木质素等成分,作为一类纯天然生物资源,可广泛应用于现代医药、食品、化工、建筑等领域。因此,本研究探索从

桑枝皮纤维脱胶废液中高效分离回收半纤维素、果胶和木质素的工艺,分析pH值、95%乙醇的用量对半纤维素、果胶和木质素得率的影响,并测定回收样品的化学结构,检测脱胶废液处理前后总有机碳(TOC)、化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)、pH值的变化,以期为实现桑枝皮纤维的清洁化生产和资源高效利用,提升该项产业的经济效益和环境效益提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料及主要试剂

桑枝皮由湖州市农业科学研究院提供。收集桑枝皮纤维制备<sup>[7]</sup>中产生的脱胶废液。

盐酸、氨水、氢氧化钠、三聚磷酸盐、硅酸钠、乙醇等均为分析纯,购自杭州米克化工仪器有限公司。

1.2 脱胶废液中3种组分的分离回收工艺

桑枝皮纤维脱胶废液中半纤维素、果胶和木质素3种组分的分离回收工艺流程如图1所示。利用1 mol/L HCl溶液调节脱胶废液pH至2.5~6.5,再

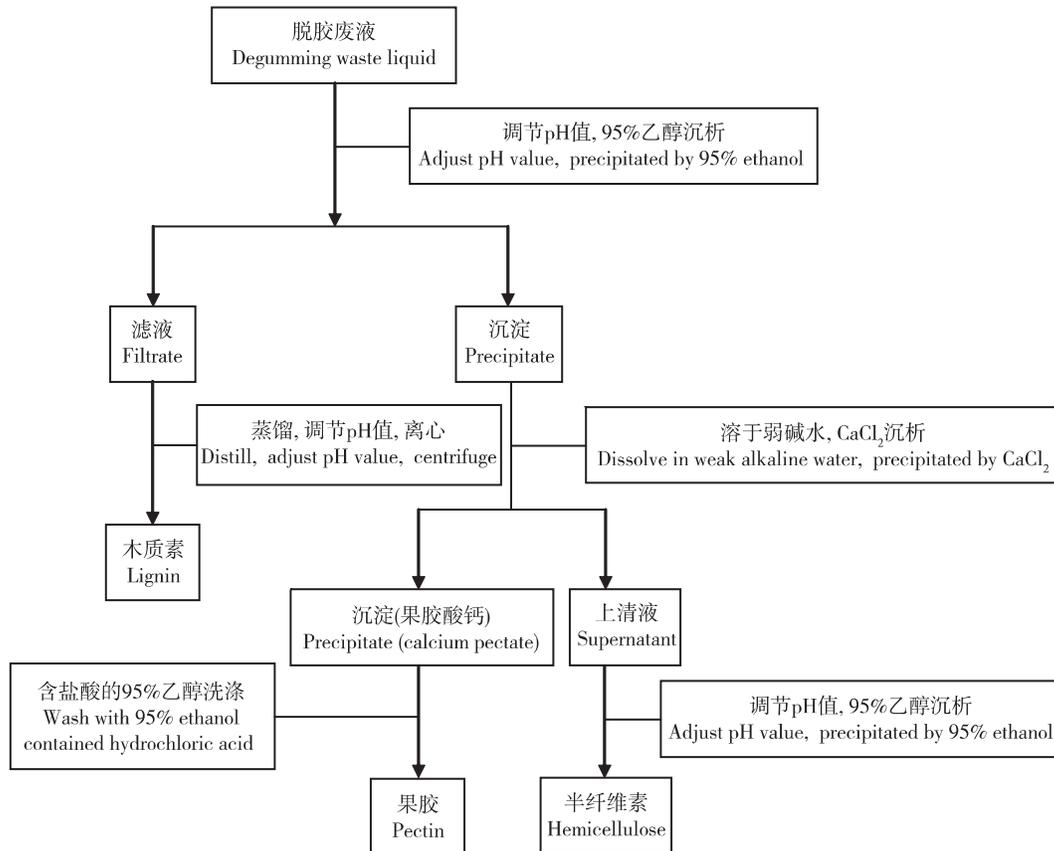


图1 桑枝皮纤维脱胶废液中的3种组分回收处理工艺流程

Fig. 1 Recycling process flow diagram for three kinds of components of the degumming waste liquid of mulberry bark fibers

向脱胶废液中按体积比 1:0.8~1:4 梯度加入 95% 乙醇, 静置沉析 1 h, 5 000 r/min 离心 10 min, 分离上清为含木质素溶液, 沉淀为果胶和半纤维素的混合物; 将果胶和半纤维素的混合物溶于水, 调节 pH 至 8.5<sup>[8]</sup>, 加入 50 g/L CaCl<sub>2</sub> 溶液 20 mL, 静置沉析 4 h, 5 000 r/min 离心 10 min, 将得到的沉淀先用去离子水洗涤, 再用 12 mol/L HCl 与 95% 乙醇的体积比为 1:40 的混合液洗涤, 即为果胶样品, 离心所得上清液调节 pH 至 5 后加入 4 倍体积的 95% 乙醇进行醇析<sup>[9-10]</sup>, 所得沉淀用 95% 乙醇清洗, 即为半纤维素样品; 上述含木质素的上清溶液经 60 °C 减压蒸馏乙醇后, 调节 pH 至 3, 静置 30 min, 再 60 °C 加热 30 min, 不断搅拌, 冷却至室温, 于冷水中静置 12 h 后, 5 000 r/min 离心 10 min, 所得沉淀即为木质素样品<sup>[11]</sup>。

### 1.3 3 种组分分离回收处理产生废液中的乙醇回收

收集经“1.2”所述方法处理后所有含乙醇上清液及蒸馏所得馏分, 先后在 90 °C 和 80 °C 下 2 次减压蒸馏 30 min, 采用乙醇量测定法<sup>[12]</sup>测定所回收乙醇的体积分数, 并按下式计算乙醇回收率。乙醇回收率 (%) =  $\frac{V_1 \times \bar{\omega}_1}{V_0 \times \bar{\omega}_0} \times 100\%$ 。式中:  $V_1$  (mL) — 回收乙醇的体积;  $\bar{\omega}_1$  (%) — 回收乙醇的体积分数;  $V_0$  (mL) — 所加乙醇体积;  $\bar{\omega}_0$  (%) — 所加乙醇的体积分数。

### 1.4 脱胶废液中回收 3 种组分样品的得率计算

回收所得半纤维素、果胶和木质素样品经真空冷冻干燥后称量, 测定其回收得率, 计算公式如下:

$$P_i (\%) = \frac{m_i}{m_0 \times \bar{\omega}_i} \times 100\%。 \text{ 式中: } P_i (\%) \text{ — 回收所得半纤维素、果胶和木质素得率 } (i = 1, 2, 3);$$

$m_0$  (g) — 初始桑枝皮质量;  $m_i$  (g) — 回收所得半纤维素、果胶和木质素的质量 ( $i = 1, 2, 3$ );  $\bar{\omega}_i$  (%) — 初始桑枝皮中半纤维素、果胶和木质素的质量分数 ( $i = 1, 2, 3$ )。

### 1.5 回收 3 种组分的纯度测定和结构分析

果胶样品酯化度按照《美国食品用化学品法典》(FCC V 2004) 采用滴定法<sup>[13]</sup>测定; 果胶样品总半乳糖醛酸含量采用吡唑比色法<sup>[14]</sup>测定。半纤维素作为一种杂多糖, 性质难以鉴定, 因此采用苯酚-硫酸法<sup>[15-16]</sup>测定半纤维素样品总糖含量。木质素

纯度采用硫酸法<sup>[15-16]</sup>测定。

采用 KBr 压片法以美国热高公司生产的 Nicolet 5700 型傅里叶变换红外光谱仪鉴定半纤维素、果胶和木质素的化学结构。

### 1.6 脱胶废液处理前后各项水质指标的测试

采用美国 ROSEMOUNT 公司的 DC-190 型总有机碳测试仪, 参照国标 GB13193—91《水质 总有机碳的测定-非色散红外吸收法》测定脱胶废液处理前后总有机碳 (TOC) 含量变化; 参照国标 GB11914—89《水质 化学需氧量的测定-重铬酸钾法》测定脱胶废液处理前后化学需氧量 (COD) 含量变化; 参照国标 GB11901—89《水质 悬浮物的测定-重量法》测定脱胶废液处理前后悬浮物 (SS) 含量变化; 采用 Sartorius PB-10 pH 计检测脱胶废液处理前后 pH 值的变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 分离回收工艺中脱胶废液 pH 值和乙醇用量对 3 种组分得率的影响

2.1.1 脱胶废液 pH 值 为有效分离桑枝皮纤维脱胶废液中半纤维素、果胶和木质素 3 种组分, 在脱胶废液与 95% 乙醇的体积比为 1:1 情况下, 以 1 的梯度调节脱胶废液 pH 值为 2.5~6.5, 分析 pH 值对半纤维素、果胶和木质素得率的影响, 其结果如图 2 所示。调节脱胶废液 pH 至 2.5~4.5 之间, 半纤维素和果胶得率随 pH 值变大而增加, 当 pH 值为 4.5 时, 半纤维素和果胶的得率均达到最高, 分别为

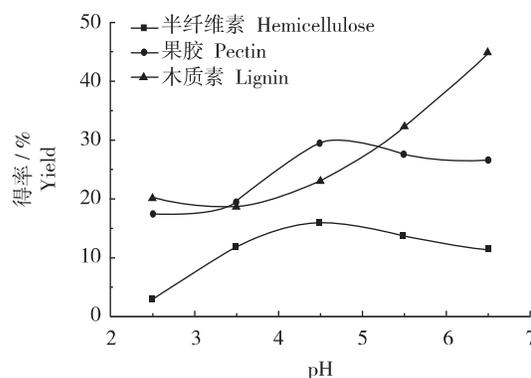


图 2 桑枝皮纤维脱胶废液 pH 值对半纤维素、果胶和木质素得率的影响

Fig. 2 Effect of pH value of the degumming waste liquid of mulberry bark fibers on recovery yields of hemicellulose, pectin and lignin

15.90%和29.41%。当脱胶废液 pH 值继续增大,半纤维素和果胶得率呈下降趋势。这可能是由于脱胶废液 pH 较低时,较强的酸性环境造成半纤维素和果胶发生水解而导致这 2 种组分的得率较低;而脱胶废液 pH 较高时,又不利于半纤维素和果胶的聚集沉淀,同样导致 2 种组分的得率较低。而木质素的得率在 pH 2.5~6.5 范围内随着 pH 值变大而增加,且在较低的 pH 条件下,易于与果胶和纤维素发生共沉淀。因此,综合考虑 3 种组分的得率和分离效果,设定分离提纯半纤维素、果胶和木质素的适宜 pH 值为 4.5。

2.1.2 沉淀用乙醇的用量 调节脱胶废液 pH 值为 4.5,沉析用 95% 乙醇的用量即脱胶废液与 95% 乙醇的体积比 ( $V_w/V_e$ ) 对半纤维素、果胶和木质素得率的影响见图 3。当  $V_w/V_e$  在 1:0.8~1:4 的范围内,半纤维素和果胶的得率随着乙醇用量的增加而呈现上升趋势,而木质素得率则随着乙醇用量的增加而呈下降趋势;当  $V_w/V_e$  为 1:1 时,木质素得率不再有明显下降。虽然对半纤维素、果胶得率而言,沉析用乙醇用量越大,二者的得率越高,但另一方面却造成了碱性木质素在极性溶剂乙醇中的溶解,使其得率降低,并且大量乙醇的使用也会增加成本和加大乙醇回收工作量。综合考虑这 2 个方面,分离提纯半纤维素、果胶和木质素工艺条件中脱胶废液与 95% 乙醇的体积比设定为 1:2。

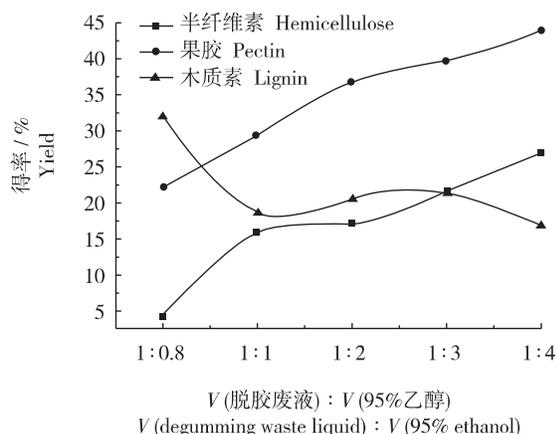


图 3 桑枝皮纤维脱胶废液与 95% 乙醇的体积比对半纤维素、果胶和木质素得率的影响

Fig. 3 Effect of volume ratio of the degumming waste liquid of mulberry bark fibers to 95% ethanol on recovery yields of hemicellulose, pectin and lignin

## 2.2 分离回收 3 种组分的纯度及废液中乙醇的回收率

按照“1.5”所述方法测算从桑枝皮纤维脱胶废液中回收所得半纤维素中总糖的质量比为 0.96 mg/mg,说明回收半纤维素样品中的多糖组分具有较高纯度,而蛋白质等杂组分含量较低。采用咔唑比色法测得回收果胶中总半乳糖醛酸的质量分数为 74.1%,纯度较高,超过国标规定食用级果胶纯度要求最小值 65%<sup>[13]</sup>,其酯化度测试结果为 34.5%,表明从脱胶废液中回收得到的果胶为低酯果胶,可作为天然绿色食品添加剂使用。由于木质素对酸稳定<sup>[15-16]</sup>,因此采用硫酸法水解去除回收木质素样品中的酸性可溶组分后,测得木质素纯度为 94.1%。

另一方面,3 种组分回收过程中所产生的含乙醇废液先后经 90 °C 和 80 °C 2 次减压蒸馏 30 min,回收得到体积分数为 92% 的乙醇,其回收率达 87%,具有较好的回收效果,可进一步循环使用以降低生产成本。

## 2.3 分离回收 3 种组分的化学结构分析

进一步采用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 测定回收半纤维素、果胶、木质素样品的化学结构 (图 4)。从半纤维素样品的红外光谱 (图 4-a) 中可以看出,在特征指纹区  $1\ 044\ \text{cm}^{-1}$  处存在 1  $\beta$ -D-吡喃型木糖苷的最大特征谱带,说明回收半纤维素为聚木糖类<sup>[17-18]</sup>,在  $1\ 420\ \text{cm}^{-1}$  处的特征峰说明样品中有甲氧基 ( $-\text{O}-\text{CH}_3$ ) 的存在<sup>[18-19]</sup>,另外在  $1\ 632\ \text{cm}^{-1}$  处存在  $-\text{COOH}$  的伸缩振动,而在  $1\ 765\sim 1\ 715\ \text{cm}^{-1}$  没有检测到酯化羰基的存在,说明回收半纤维素组分中存在醛酸结构<sup>[19]</sup>,因此可以初步确定从桑枝皮纤维脱胶废液中回收得到的半纤维素主要成分为 4-甲氧基葡萄糖醛酸聚木糖。已有文献报道落叶阔叶木韧皮中半纤维素主要是 4-甲氧基葡萄糖醛酸聚木糖<sup>[20]</sup>。从果胶样品的红外光谱 (图 4-b) 可以看出,除在  $1\ 151, 1\ 081, 1\ 026\ \text{cm}^{-1}$  附近的强吸收峰证明其中的单糖以吡喃糖苷的形式存在外,在  $1\ 740\ \text{cm}^{-1}$  和  $1\ 240\ \text{cm}^{-1}$  处有红外特征峰表明回收果胶结构中含有 O-乙酰基和酯基,说明了糖醛酸的存在。此外,在果胶分子中,  $1\ 600\sim 1\ 800\ \text{cm}^{-1}$  范围内的吸收峰对鉴定果胶类型是非常重要的,  $1\ 641, 1\ 740\ \text{cm}^{-1}$  吸收谱带分别归属于非酯化羰基和酯化羰基,可根据 2 个峰的峰面积计算果胶酯化度<sup>[21-23]</sup>。从图 4-b 中可以看出,  $1\ 641\ \text{cm}^{-1}$  处非

酯化羰基的峰面积要大于  $1740\text{ cm}^{-1}$  处酯化羰基的峰面积,说明回收果胶样品为低酯果胶。这与滴定法测得的酯化度结果相一致。在木质素样品的红外光谱(图4-c)中,  $1641\text{ cm}^{-1}$  处的特征峰是由于芳香环  $\text{C}=\text{C}$  伸缩振动引起的,  $1450\text{ cm}^{-1}$  处的特征峰为苯环骨架振动,  $1270\sim 1232\text{ cm}^{-1}$  吸收峰是由于芳香环( $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ )引起的,而  $1410\text{ cm}^{-1}$  处有甲氧基( $-\text{O}-\text{CH}_3$ )的特征峰出现<sup>[18-19]</sup>,说明所回收得到的木质素归属于愈创木基或紫丁香基木质素。

另外值得关注的是,从图4中可以看出,回收得到的半纤维素和果胶分子中都存在羰基( $\text{C}=\text{O}$ )伸缩振动峰,2个峰位置和形状略有不同,这主要是由于2种样品中羰基的含量和位置不同引起的。果胶分子主要是以多聚半乳糖醛酸为主链构成的生物多糖,而半纤维素分子则主要是以  $1\text{-}\beta\text{-D}$ -吡喃型木糖构成主链,以4-甲氧基-吡喃型葡萄糖醛酸为支链的多糖,其中仅含少量葡萄糖醛酸作为支链。因此,桑枝皮纤维脱胶废液中的果胶分子含有的羰基很容易和钙离子络合成为空间网状结构而沉淀出来,而半纤维素除了由于包埋作用引起少量共沉淀外很少会与钙离子络合析出。由此说明本试验采用的分离回收工艺以  $50\text{ g/L}$   $\text{CaCl}_2$  溶液分离半纤维素和果胶样品的方法是切实可行的。文献[24]中的报道也证实,在低浓度下  $\text{Ba}^{2+}$  离子无法因络合作用而使4-甲氧基-葡萄糖醛酸聚木糖沉淀,而  $\text{Ca}^{2+}$  离子的络合能力低于  $\text{Ba}^{2+}$  离子。因而低浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  离子也无法因络合作用而使4-甲氧基-葡萄糖醛酸聚木糖沉淀。

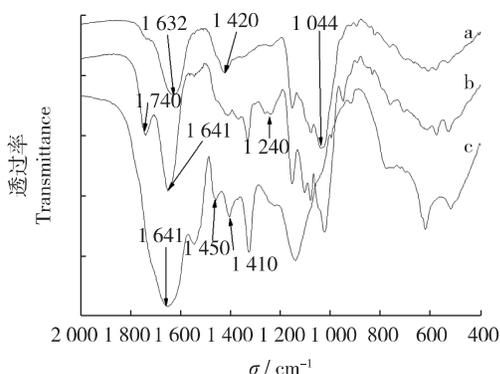


图4 从桑枝皮纤维脱胶废液分离提纯的半纤维素(a)、果胶(b)和木质素(c)的傅里叶变换红外光谱图

Fig. 4 Fourier transform infrared spectra of hemicellulose (a), pectin (b) and lignin (c) isolated and purified from the degumming waste liquid of mulberry bark fibers

## 2.4 脱胶废液处理前后各项水质指标的变化

表1列出了桑枝皮纤维脱胶废液处理前后的TOC、COD、SS、pH值检测数据及颜色的变化。脱胶废液经回收处理后,TOC、COD含量明显降低,分别由原来的  $4.90\text{ g/L}$  和  $13.07\text{ g/L}$  降低至  $0.32\text{ g/L}$  和  $0.85\text{ g/L}$ ,总去除率达到了  $93.5\%$  和  $93.5\%$ ,可见分离回收脱胶废液中的果胶、半纤维素和木质素等组分后,废液中有机物质的含量明显减少,且废液中已经没有颗粒物存在(SS值为0),其pH值由13.0降低至8.4,废液颜色也由原来的深褐色变为浅黄色(图5),达到了国标GB8978—1996《污水综合排放标准》中第2类污染物的3级排放标准。说明通过本试验采用的桑枝皮纤维脱胶废液回收工艺既可有效回收生产废液中的半纤维素、果胶、木质素等天然生物资源,又可解决产业化生产中的脱胶废液所带来的二次环境污染问题。

表1 桑枝皮纤维脱胶废液处理前后各项水质指标的变化

Table 1 Water quality index variation of the degumming waste liquid of mulberry bark fibers before and after treatment

水质指标 Water quality index	处理前 Before treatment	处理后 After treatment
总有机碳 / ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) TOC	4.90	0.32
化学需氧量 / ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) COD	13.07	0.85
悬浮物 / ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) SS	1.08	0
pH	13.0	8.4
颜色 Color	深褐色 Dark brown	浅黄色 Light yellow



左为处理前,右为处理后。

Left: before treatment. Right: after treatment.

图5 桑枝皮纤维脱胶废液处理前后的颜色对比

Fig. 5 A comparison on color of the degumming waste liquid of mulberry bark fibers before and after treatment

### 3 结论

本试验通过调节废液 pH 值,利用乙醇沉析工艺将半纤维素和果胶首先从桑枝皮纤维脱胶废液中沉淀出来,再利用金属离子  $\text{Ca}^{2+}$  对果胶分子中醛酸的络合作用将半纤维素和果胶分离开来,并进一步回收木质素。分析脱胶废液 pH 值以及沉析用乙醇的用量对 3 种组分得率的影响,调节脱胶废液 pH 值为 4.5,脱胶废液与 95% 乙醇的体积比为 1:2,回收所得到的半纤维素、果胶和木质素具有较高的纯度和得率,且由于加入  $\text{CaCl}_2$  溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  不同的络合作用,避免了半纤维素和果胶的共沉淀,保证了二者的有效分离。红外光谱对回收样品的化学结构解析表明,分离回收半纤维素样品的主要成分为 4-甲基葡萄糖醛酸聚木糖,果胶样品主要成分为半乳糖醛酸,木质素样品的主要成分为愈创木基或紫丁香基木质素。处理后脱胶废水中有机物去除效果明显,达到了国标规定的第 2 类污染物 3 级排放标准。

本试验所采用的分离回收工艺使桑枝皮纤维脱胶废液中的各种可利用组分得到有效分离,不仅可以为突破桑枝皮纤维产业化生产发展的瓶颈问题,实现桑枝皮纤维的清洁化、高效益生产,同时也可为其其它韧皮纤维脱胶废液的回收利用提供参考。

#### 参考文献 (References)

- [1] 林天宝,李有贵,吕志强,等.桑树资源综合利用研究进展[J].蚕桑通报,2008,39(3):1-4
- [2] 沈以红,朱见.桑树资源综合利用研究概述[J].蚕学通讯,2007,27(1):5-9
- [3] 马君志,杜丽霞.桑枝皮纤维的制备及其产品开发[J].纺织导报,2007(5):67-69
- [4] 李冬梅,吴长春,杨佩鹏,等.桑枝皮纤维染色性能研究[J].纺织科技进展,2008(6):78-79
- [5] 张焕然,胡心怡.桑皮纤维/棉纤维混纺纺织物的力学性能研究[J].青岛大学学报:工程技术版,2010,25(1):46-49
- [6] Cong R L, Dong W G. Structure and property of mulberry fiber [J]. Modern Appl Sci, 2007, 1(4): 14-17
- [7] 刘琳,费建明,占鹏飞,等.用桑枝皮提取果胶及制备的纳米纤维素晶须在丝素复合膜中的应用[J].蚕业科学,2010,36(1):20-24
- [8] Das N N, Das A, Mukherjee A K. Structure of the D-galactan isolated from garlic (*Allium sativum*) Bulbs [J]. Carbohydr Res, 1977, 56(2): 337-349
- [9] 任俊莉,彭锋,彭新文,等.农业秸秆半纤维分离及纯化技术研究进展[J].纤维素科学与技术,2010,18(3):56-67
- [10] 尉慰奇,武书彬,彭云云.麦草水溶性和碱溶性半纤维素的分离与表征[J].林产化学与工业,2010,30(6):66-70
- [11] 马晓伟,代斌,杨兴华.酸析法提取芦苇纸浆黑液中的木质素[J].化工技术与开发,2007,36(8):44-46
- [12] 国家药典委员会.中国药典[M].北京:中国医药科技出版社,2000:附录IX
- [13] Institute of Medicine of the National Academies. Food chemical codex [M]. 5th ed. Washington D C: NAP, 2004: 322-323
- [14] Taylor K A C C. A colorimetric method for the quantitation of galacturonic acid [J]. Appl Biochem Biotech, 1993, 43(1): 51-54
- [15] 王玉万,徐文玉.木质纤维素固体基质发酵物中半纤维素、纤维素和木素的定量测定分析程序[J].微生物学报,1987(2):82-84
- [16] 李华,孔新刚,王俊.秸秆饲料中纤维素、半纤维素和木质素的定量分析研究[J].新疆农业大学学报,2007,30(3):65-68
- [17] Kacuráková M, Capek P, Sasinková V, et al. FT-IR study of plant cell wall model compounds: pectic polysaccharides and hemicelluloses [J]. Carbohydr Polym, 2000, 43(2): 195-203
- [18] Yang H P, Yan R, Chen H P, et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis [J]. Fuel, 2007, 86(12/13): 1781-1788
- [19] Morán J I, Alvarez V A, Cyras V P, et al. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibres [J]. Cellulose, 2008, 15(1): 149-159
- [20] 高洁,汤列贵.纤维素科学[M].北京:科学出版社,1999:224-226
- [21] Monsoor M A, Kalapathy U, Proctor A. Determination of polygalacturonic acid content in pectin extracts by diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Food Chem, 2001, 74(2): 233-238
- [22] Monsoor M A, Kalapathy U, Proctor A. Improved method for determination of pectin degree of esterification by diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy [J]. J Agric Food Chem, 2001, 49(6): 2756-2760
- [23] Gnanasambandam R, Proctor A. Determination of pectin degree of esterification by diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Food Chem, 2000, 68(3): 327-332
- [24] 张维杰.糖复合物生化研究技术[M].杭州:浙江大学出版社,1999:325-347