

# 基于低共熔溶剂预处理杜仲皮 高效提取杜仲胶的研究

梁云<sup>1,2</sup>, 杜文桥<sup>3</sup>, 王力石<sup>4</sup>, 杨波<sup>3</sup>, 杨雪<sup>3</sup>, 王巍<sup>2,3</sup>, 张凤清<sup>1\*</sup>, 张龙<sup>2\*</sup>

(1. 长春工业大学化学与生命科学学院, 吉林 长春 130012;

2. 长春工业大学化学工程学院, 吉林省石化资源与生物质综合利用工程实验室, 吉林 长春 130012;

3. 吉林省产品质量监督检验院, 吉林 长春 130103; 4. 吉林省特种设备检验研究院, 吉林 长春 130103)

**摘要:**杜仲胶(EUG)由反式-1,4-聚异戊二烯(TPI)组成,作为一种重要的生物基聚合物材料,在环境、农业、高分子材料改性和生物医学等领域获得了广泛应用。因此,开发出一种三元碱性低共熔溶剂(DES)协同表面活性剂高效预处理杜仲皮,再结合石油醚萃取高效提取EUG的工艺方法。获得了优化的预处理条件为固液比1:12,时间4 h,温度80℃、10%吐温80(Tween-80)和萃取条件为温度80℃、时间2 h、固液比1:10,EUG产率最高为66.0%。回收的DES循环使用5次,EUG的产率仍保持不变。分析测试表明该方法获得的EUG不仅提取率高且结构完整、性能良好等特点,研究结果为对EUG的高效提取利用提供了新的途径。

**关键词:**杜仲胶;反式聚异戊二烯;低共熔溶剂;提取;结构;性能

中图分类号:TQ819;TQ-33

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0228-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.038

## Research on efficient extraction of *Eucommia ulmoides* gum by deep eutectic solvent pretreatment from *Eucommia ulmoides* bark

LIANG Yun<sup>1,2</sup>, DU Wen-qiao<sup>3</sup>, WANG Li-shi<sup>4</sup>, YANG Bo<sup>3</sup>, YANG Xue<sup>3</sup>, WANG Wei<sup>2,3</sup>,  
ZHANG Feng-qing<sup>1\*</sup>, ZHANG Long<sup>2\*</sup>

(1. College of Chemical and Life Sciences, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. Jilin Provincial Engineering Laboratory for Complex Utilization of Petroresources and Biomass,

College of Chemical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

3. Jilin Province Product Quality Supervision and Inspection Institute, Changchun 130103, China;

4. Jilin Special Equipment Inspection and Research Institute, Changchun 130103, China)

**Abstract:** *Eucommia* gum (EUG) is composed of trans-1,4-polyisoprene (TPI). As an important biological material, it has been widely applied in fields such as the environment, agriculture, polymer material modification, and biomedicine. In this study, an efficient method was developed for the pretreatment of *Eucommia ulmoides* bark using a ternary alkaline deep eutectic solvent (DES) in combination with a surfactant, followed by petroleum ether extraction to obtain EUG. The optimal parameters for the pre-treatment solid-liquid ratio was 1 : 12, the time was 4 hours, the temperature was 80℃, 10 wt% Tween-80 was used, and the extraction conditions were temperature of 80℃, time of 2 hours, and solid-liquid ratio of 1 : 10. The highest extraction yield of EUG was 66.0%. The recovered DES could be recycled five times without a significant decrease in EUG yield. The analysis and testing have shown that this new process has the advantages of high extraction yield of EUG, complete structure and good performances. The research results provide a new approach for the efficient extraction and utilization of EUG.

**Key words:** *Eucommia* gum; trans-polyisoprene; eutectic solvent; extraction; structure; performance

反式-1,4-聚异戊二烯(TPI)独特的“橡-塑”双重性,成为改性塑料、功能材料的热门选择<sup>[1]</sup>。TPI分为天然和合成两种,合成TPI属于石油基材料,其制备过程对环境副效应大<sup>[2]</sup>,天然TPI又称杜仲胶(EUG),是一种从杜仲组织中提取的天然

材料<sup>[3]</sup>。

EUG提取工艺的核心难点在于如何使EUG从紧密的杜仲植物细胞壁结构中暴露出来<sup>[4]</sup>。目前,主要通过物理法<sup>[5]</sup>、化学法<sup>[6]</sup>或微生物法<sup>[7]</sup>等预处理方法破坏细胞壁结构,进而提高后续EUG的产

收稿日期:2026-02-10;修回日期:2026-03-17

基金项目:吉林省市场监督管理局科技计划项目(2024MK001)

作者简介:梁云(1999-),女,硕士生,研究方向为生物学,1409677561@qq.com;张凤清(1967-),女,硕士,教授,硕士生导师,研究方向天然产物及功能食品开发,通讯联系人,1044424827@qq.com;张龙(1966-),男,硕士,教授,博士生导师,研究方向绿色化学与清洁生产,通讯联系人,zhanglongzhl@163.com。

率<sup>[8]</sup>。但现有的方法对 EUG 的结构造成破坏,影响后续的应用<sup>[9]</sup>。Lin 等<sup>[10]</sup>利用离子液体(IL)预处理杜仲皮,有效破坏细胞壁提取 EUG,但因合成成本高且回收复杂限制了其在工业应用中的应用。低共熔溶剂(DES)作为一种新型溶剂发展快速,广泛用于杨树、竹子和玉米等各种生物质的预处理过程<sup>[11]</sup>。Liu 等<sup>[12]</sup>采用氯化胆碱-草酸体系预处理杨木,通过裂解木质素-碳水化合物复合体(LCC)提取木质素,提取率为 17.5%;Wu 等<sup>[13]</sup>采用甘油-碳酸钾-聚乙二醇体系预处理小麦秸秆提取纤维素,纤维素提取率达 73.65%;Poy 等<sup>[14]</sup>采用氯化胆碱-对甲苯磺酸-乙二醇体系预处理稻草溶解木质素来提高纤维素的提取率,进而使后续葡萄糖产率达到 93.4%。DES 作为新型溶剂对于生物质预处理具有显著的效果;Duan 等<sup>[15]</sup>采用氯化胆碱-草酸-乙二醇体系预处理杜仲籽壳提取 EUG,提取率为 85.10%;Yao 等<sup>[9]</sup>采用乳酸-氯化锌酸性体系预处理杜仲果,EUG 的提取率达到 90.10%,测试发现 EUG 中的  $\beta$  峰消失,是因为酸性环境破坏了 EUG 晶体结构;Zhou 等<sup>[16]</sup>采用氯化胆碱-尿素碱性体系预处理杜仲皮,EUG 的提取率为 22.98%,EUG 具有完整的晶体结构,碱性 DES 在提取 EUG 领域具有巨大潜力。

针对上述问题,为了提高 EUG 的提取率,并保证其结构的完整性,本文基于现有的 DES 研究基础之上设计了一种新型的三元碱性 DES 体系并实现了从杜仲皮中杜仲胶的高效提取。以杜仲皮为原料,采用氯化胆碱-丙三醇-氢氧化钾三元碱性体系,协同表面活性剂高效预处理杜仲皮,萃取获得高质量的 EUG。分别探究了预处理条件对残渣率的影响、萃取条件对 EUG 产率的影响,通过表征测试了 EUG 的结构和性能,优化了提取条件,并对 DES 循环回收工艺及重复使用性能进行了研究。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料与试剂

杜仲购自河南灵宝;氯化胆碱购自山东奥博生物科技有限公司;丙三醇、氢氧化钾、吐温-80(Tween-80)购自上海麦克林生化科技股份有限公司;石油醚购自天津新通精细化工有限公司;以上试剂均为分析纯。实验用水为去离子水。

### 1.2 实验设备

扫描电子显微镜(SEM),JSM-7610F型,北京捷鸥路科贸有限公司;核磁共振波谱仪(NMR),

ANAVCE500型,德国 Bruker 公司;傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR),VERTEX70型,德国 Bruker 公司;X射线衍射仪(XRD),D8-advanced型,德国 Bruker 公司;差示扫描量热仪(DSC),JQH0170型,METTLER TOLEDO 公司;热重分析仪(TG),STA200型,日立分析仪器有限公司;万能试验机,AGS-X100N型,日本岛津公司。

### 1.3 EUG 的提取过程

(1)DES 制备:称取 100.0 g 氯化胆碱与 200.0 g 丙三醇置于 500 mL 烧杯中,在 80℃ 下进行搅拌,直至形成均一透明的液体且室温不凝固,放置冷却后,用 1.0 mol/L 氢氧化钾将溶液 pH 调至为 12。

(2)EUG 预处理:将杜仲皮洗净烘干,粉碎过筛,得到 60~80 目原料备用。将 10.0 g 原料、120.0 g DES 和 13.0 g Tween-80 置于 250 mL 烧杯中,在 80℃ 下搅拌反应 4 h。结束后抽滤清洗去除液体,获得残渣。

(3)EUG 萃取:将上述的残渣放入索氏提取器中,加入 100 mL 石油醚回流抽提,在 80℃ 下抽提 2 h。反应结束后,离心获得上清液置于 250 mL 圆底烧瓶中,80℃ 下减压蒸馏,直至石油醚全部蒸出,得到白色固体 EUG,称重,放置样品袋中常温保存。

(4)EUG 产率计算:

$$Yield = [M_2 / (M_1 \times C)] \times 100\% \quad (1)$$

式中, Yield 为产率,%;  $M_1$  为杜仲皮干重, g;  $M_2$  为杜仲胶, g; C 为杜仲皮的胶含量, 12%。

### 1.4 DES 的回收再利用

使用后的 DES 用 3 倍无水乙醇醇沉 24 h,抽滤分离不溶固体残渣<sup>[17]</sup>,液体在 80℃ 下减压蒸馏,直至乙醇全部蒸出后,放入 100℃ 的烘箱中干燥除水得到回收 DES。

### 1.5 测试与表征方法

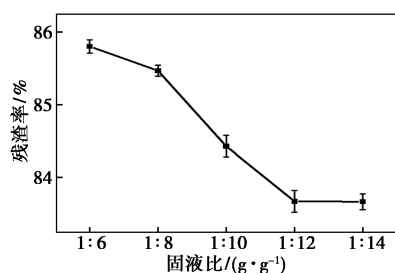
采用 SEM 分析 EUG 的微观形貌结构;采用 NMR 分析 EUG 的分子结构;采用 FT-IR 分析 EUG 的官能团结构;采用 XRD 和 DSC 分析 EUG 的结晶结构;采用 TG 测试 EUG 的热稳定性;采用万能试验分析 EUG 的力学性能。

## 2 结果与讨论

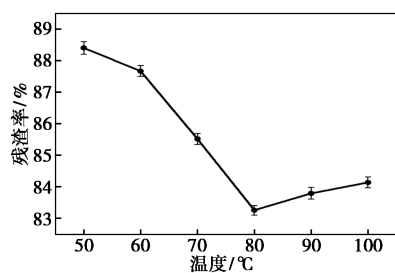
### 2.1 预处理条件对残渣率的影响

细胞壁主要由纤维素、半纤维素与木质素紧密结合、相互缠绕构成,成为 EUG 提取的阻碍。DES 可以破坏细胞壁结构,使 EUG 暴露出来。预处理后残渣质量越少,证明非有效组分的去除率越高,预处

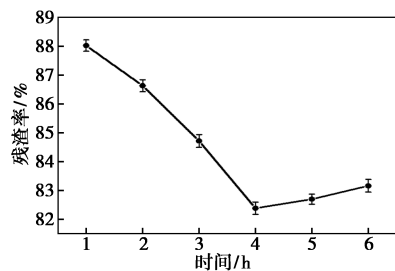
理效果越好。预处理条件对残渣率的影响结果如图 1 所示。



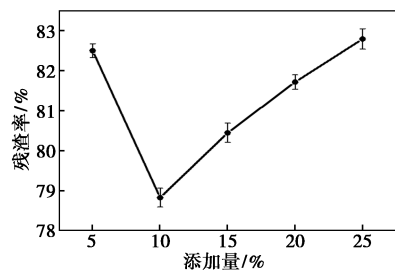
(a) 固液比对残渣率的影响  
(反应条件: 1 h, 50℃, 5% Tween-80)



(b) 温度对残渣率的影响  
(反应条件: 1:12, 1 h, 5% Tween-80)



(c) 时间对残渣率的影响  
(反应条件: 1:12, 80℃, 5% Tween-80)



(d) Tween-80 添加量对残渣率的影响  
(反应条件: 1:12, 4 h, 80℃)

图 1 预处理对残渣率的影响结果

图 1(a) 为固液比对残渣率的影响。残渣率随固液比的升高, 先下降后保持不变。当固液比提高到 1:12 时, 残渣率降低到 83.6%, 固液比继续增加, 体积溶剂达到溶解平衡, 溶剂浓度达到饱和, 残渣率基本保持不变。

图 1(b) 为温度对残渣率的影响。残渣率随温

度的升高, 呈先下降后上升的趋势。当温度升高到 80℃ 时, 残渣率减少到 83.26%, 温度继续升高, 残渣率开始增多。当温度进一步升高时, 碱处理会使半纤维素降解, 降解产物会与木质素碎片发生反应, 形成不溶性的木质素-碳水化合物复合体, 从而导致残渣率升高。

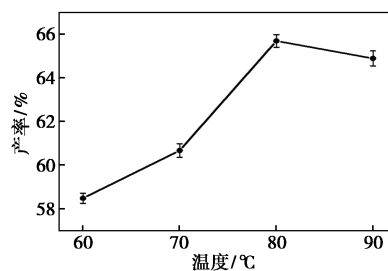
图 1(c) 为时间对残渣率的影响。残渣率随时间的升高, 呈先下降后上升的趋势。反应时间增加到 4 h, 残渣率减少到 82.37%, 时间继续增加, 残渣率开始增多。随着反应时间延长, 碱处理木质素解聚产生的活性中间体会与酚羟基等发生分子间缩合, 形成更顽固的 C-C 键, 重新变成不溶性大分子, 从而导致残渣率升高。

图 1(d) 为 Tween-80 添加量对残渣率的影响。残渣率随 Tween-80 添加量的升高, 也呈先下降后上升的趋势。当添加量到 10% 时, 残渣率减少到 78.82%, 添加量继续增加, 残渣率开始增多。过量的 Tween-80 会在体系中形成球状胶束将杜仲中木质素包裹进去, 使其无法溶出, 进而导致残渣率升高。

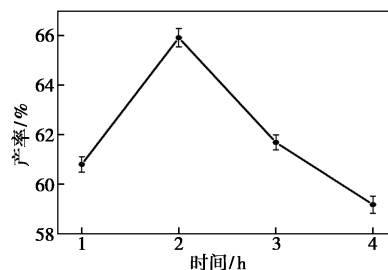
通过上述实验, 得到的最佳预处理工艺条件为: 固液比 1:12、反应时间 4 h、反应温度 80℃、10% (质量分数) Tween-80, 残渣率最少为 78.82%, 用作后续提取原料。

## 2.2 萃取工艺条件对 EUG 产率的影响

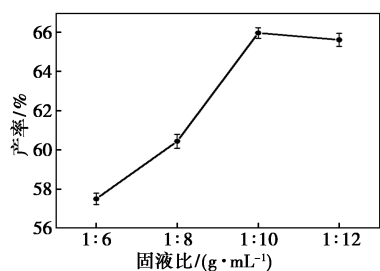
根据上述最佳预处理条件, 获得的残渣为原料利用石油醚萃取 EUG, 萃取工艺条件对 EUG 产率的影响, 如图 2 所示。



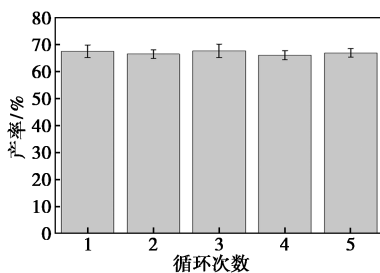
(a) 温度对 EUG 产率的影响 (反应条件: 1:6, 1 h)



(b) 时间对 EUG 产率的影响 (反应条件: 1:6, 80℃)



(c) 固液比对 EUG 产率的影响(反应条件:2 h,80℃)



(d) 循环次数对 EUG 产率的影响

图 2 萃取工艺对 EUG 产率的影响结果

图 2(a) 为温度的影响。随温度的升高,EUG 产率先升高后降低。当时间升高到 80℃ 时,EUG 产率增加到 65.69%。温度过高时,EUG 分子链发生氧化,产生自由基相互结合,形成“碳-碳”交联键,这部分交联的 EUG 无法被溶剂溶解,进而导致产率降低。

图 2(b) 为时间对 EUG 产率的影响。随时间的升高,EUG 产率先升高后降低。当时间增加到 2 h 时,EUG 产率增加到 65.90%,延长萃取时间,EUG 会发生氧化变质,导致原本溶解在石油醚中的 EUG 无法溶解,导致产率降低。

图 2(c) 为 EUG 与石油醚固液比 EUG 产率的影响。随固液比的升高,EUG 产率先升高后降低。当固液比提高到 1:10 时,EUG 产率增加到 66.0%。随着固液比继续增加,EUG 基本溶于溶剂中,溶液达到萃取平衡,产率基本不变。

图 2(d) 为回收 DES 循环 5 次对 EUG 产率的影响,EUG 的产率仍保持在 66.0%,说明 DES 具有良好的稳定性和重复使用性。

综上所述,最佳萃取工艺条件为:反应温度 80℃、反应时间 2 h、固液比 1:10,EUG 最高产率为 66.0%。

## 2.3 EUG 结构与性能表征

### 2.3.1 EUG 的结构

图 3 为 EUG 的 SEM 图。EUG 断面呈现相连的层状结构,与 TPI 具有相同的层状结构<sup>[18]</sup>。图 4 为 EUG 和 TPI 的<sup>1</sup>HNMR 谱图。EUG 与 TPI 主干上

CH<sub>2</sub> 的化学位移为 2.06 ppm 和 1.95 ppm、CH<sub>3</sub> 为 1.62 ppm、CH 为 5.11 ppm。EUG 与 TPI 在相同的位置出现相同的化学位移,结果证明,EUG 的主要组成是 TPI。图 5 为 EUG 和 TPI 的 FT-IR 图,可以看出 EUG 的反式-1,4-聚异戊二烯在 2 964、2 917、2 856 cm<sup>-1</sup> 的吸收峰分别来自 CH<sub>3</sub> 不对称伸缩、CH<sub>2</sub> 不对称伸缩和 CH<sub>2</sub> 对称伸缩,C—H<sub>2</sub> 和 C=C 伸缩振动峰分别位于 1 447 cm<sup>-1</sup> 和 1 666 cm<sup>-1</sup> 处,EUG 在 1 734 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰对应末端酯基的 C=O 伸缩振动,而 TPI 没有,是因为生物基 EUG 通过酯基进行封端<sup>[19]</sup>,而合成 TPI 是由羟基封端。

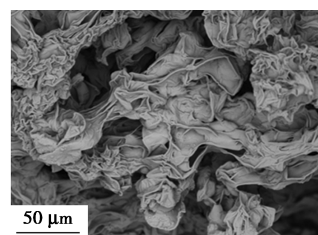
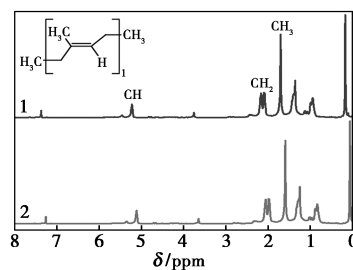
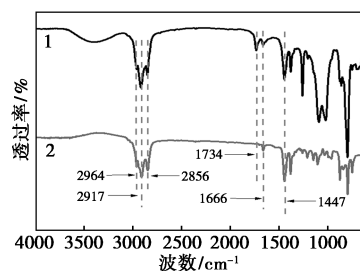


图 3 SEM 图



1—EUG;2—TPI

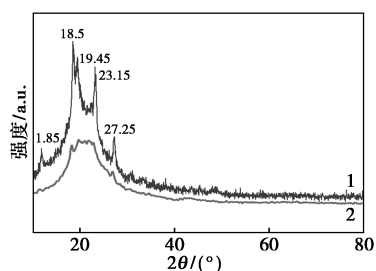
图 4 <sup>1</sup>H NMR 图

1—EUG;2—TPI

图 5 FT-IR 图

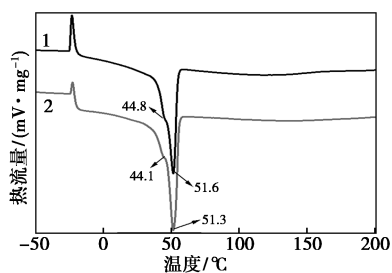
图 6 为 EUG 和 TPI 的 XRD 谱图。EUG 和 TPI 的晶型高度吻合,EUG 的 2θ 为 11.85、18.5、19.45、23.15、27.25° 处出现的尖锐峰属于 α 晶型,19.45° 和 23.15° 处的峰属于 β 晶型。图 7(a) 为 EUG 和 TPI 的 DSC 二次加热曲线图。在 EUG 和 TPI 曲线上观察到两个明显的峰(Tm<sub>1</sub> 和 Tm<sub>2</sub>),分别对应于 α 形和 β 形晶体,EUG(51.6℃)和 TPI(51.3℃)的

熔融温度 EUG 略高于 TPI,是因为 EUG 的结晶度高,晶体结构更完整,表现出更好的耐热性。图 7 (b)为 EUG 和 TPI 的 DSC 冷却曲线图。EUG 的结晶温度(21.6℃)高于 TPI 的结晶温度(18.2℃),证明 EUG 分子链结构的有序性使得结晶速率比 TPI 更快。结果表明,提取过程中,DES 没有破坏 EUG 的结构,保持了 EUG 的完整性。



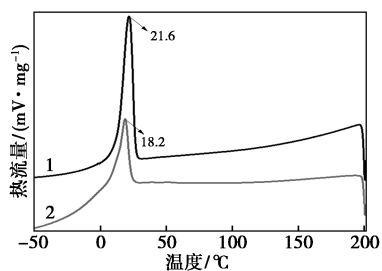
1—EUG;2—TPI

图 6 XRD 图



1—EUG;2—TPI

(a) DSC 加热曲线图



1—EUG;2—TPI

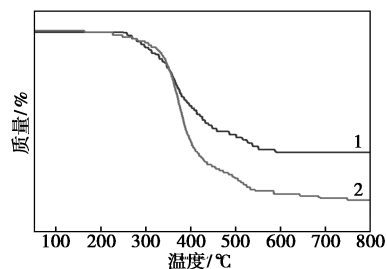
(b) DSC 冷却曲线图

图 7 DSC 加热曲线和冷却曲线图

### 2.3.2 EUG 的性能

图 8 为 EUG 和 TPI 的 TG 分析图。EUG 在 250℃左右开始失重,失重曲线下降平缓。EUG 常温下易结晶,但也存在无定形区,这些区域的分子链堆叠松散,分子间作用力较弱,先开始分解;随着温度升高,结晶区这部分最稳定的分子链也开始大规模分解。TPI 晶体结构不如 EUG 完整,或链端缺陷较多,起始分解温度在 225℃左右,且曲线下降陡峭。结果表明,采用三元低共熔溶剂体系提取的

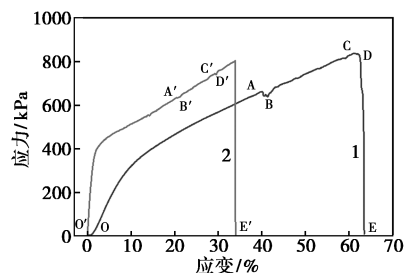
EUG 具有优异的热稳定性。



1—EUG;2—TPI

图 8 TG 图

图 9 为 EUG 和 TPI 的应力-应变曲线图。EUG 拉伸强度和断裂伸长率分别为 837 kPa 和 64%,相较于 TPI,EUG 的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了 3.71%和 30%。由于 EUG 在室温下结晶度高,呈现刚性塑料,使得拉伸强度更高;随着拉伸应力的增大,结晶度被破坏降低了 EUG 分子结构的一致性,增强了分子链的灵活性,随后导致 EUG 断裂伸长率的增加。



1—EUG;2—TPI

图 9 拉伸图

### 2.4 三元碱性 DES 提取 EUG 的作用机理分析

杜仲皮植物细胞壁中半纤维素和木质素通过氢键作用和酯键等形成了坚固的木质素-碳水化合物复合体(LCC),从而增大了 EUG 的提取难度。在预处理过程中,DES 主要通过氢键的竞争作用弱化 LCC 之间的氢键作用力,氯离子不仅可以进一步破坏 LCC 间的氢键,同时耦合碱性体系攻击 LCC 的酯键和木质素中的醚键(如  $\beta$ -O-4 键),致使 LCC 复合体的分解和木质素与半纤维素的水解。Tween-80 的加入进一步提高了提取溶剂的渗透能力,溶剂可以深入渗透到细胞壁结构中提高碱性 DES 的预处理效果。因此,通过碱性 DES 与 Tween-80 协同作用,可以高效的破坏 LCC,同时溶解木质素与半纤维素,保留富含 EUG 的纤维素,实现 EUG 的快速提取。

### 3 结论

本文成功利用氯化胆碱-丙三醇-KOH 三元碱性 DES 预处理杜仲皮高效提取 EUG, 预处理工艺条件为固液比 1:12、时间 4 h、温度 80℃、10% Tween-80 与萃取条件为温度 80℃、时间 2 h、固液比 1:10, 在优化工艺下提取的 EUG 产率达 66.0%, DES 循环 5 次提取 EUG, 产率保持不变, 证明 DES 具有良好的重复使用性。通过 FT-IR 和 <sup>1</sup>H NMR 验证了 EUG 的反式-1,4-聚异戊二烯结构; 通过 XRD、DSC 曲线和 TG 曲线证明了 EUG 的晶体完整性和优异的热稳定性; 通过万能试验机证明了 EUG 的韧性赋予了它独特的力学特性, 拉伸强度和断裂伸长率分别为 837 kPa 和 64%, 结果证明, 本工艺提取的 EUG 不仅产率高、结构完整且具备良好的综合性能。因此, 所开发的三元碱性 DES 为从杜仲植物中高效提取 EUG 提供新的具有潜在工业应用价值的工艺方法。

### 参考文献

- [1] Tsujimoto T, Toshimitsu K, Uyama K, *et al.* Maleated trans-1,4-polyisoprene from *Eucommia ulmoides* Oliver with dynamic network structure and its shape memory property [J]. *Polymer*, 2014, 55: 6488-6493.
- [2] Zhang J, Xue Z. A comparative study on the properties of *Eucommia ulmoides* gum and synthetic trans-1,4-polyisoprene [J]. *Polymer Testing*, 2011, 30: 753-759.
- [3] Xing Y, He D, Wang Y, *et al.* Chemical constituents, biological functions and pharmacological effects for comprehensive utilization of *Eucommia ulmoides* Oliver [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2019, 8: 177-188.
- [4] Han Z, Wang Q, Li Y, *et al.* Extracting *Eucommia ulmoides* gum from *Eucommia ulmoides* Oliver and exploiting the residue as sustainable filler [J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119585.
- [5] Yao X, Ma X, Pan Y, *et al.* Mechanical-chemical shearing enhanced low-energy separation and transformation of multi-components from *Eucommia ulmoides* pericarp [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 511: 162288.
- [6] Gao R, Zhang H, Li B, *et al.* Extraction of *Eucommia ulmoides* gum and microbial lipid from *Eucommia ulmoides* Oliver leaves by dilute acid hydrolysis [J]. *Biotechnology Letters*, 2023, 45: 619-628.
- [7] Liu G, Zhang Y, Xiao M, *et al.* Extracting *Eucommia ulmoides* oliv. gum by cellulase pretreatment [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2010, 30(2): 77-82.
- [8] Wang Q, Xiong Y, Dong F. *Eucommia ulmoides* gum-based engineering materials: Fascinating platforms for advanced applications [J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56: 1855-1878.
- [9] Yao X, Pan Y, Ma X, *et al.* Efficient separation and production of high-quality rubber, lignin nanoparticles and fermentable sugars from *Eucommia ulmoides* pericarp via deep eutectic solvent pretreatment [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127221.
- [10] Lin C, Yi H, Chen L, *et al.* Highly efficient extraction of *Eucommia ulmoides* gum by IL-organic solvent biphasic system [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 180: 114735.
- [11] Alvarez-Vasco C, Ma R, Quintero M, *et al.* Unique low-molecular-weight lignin with high purity extracted from wood by deep eutectic solvents (DES): A source of lignin for valorization [J]. *Green Chemistry*, 2016, 18: 5133-5141.
- [12] Liu Y, Chen W, Xia Q, *et al.* Efficient cleavage of lignin-carbohydrate complexes and ultrafast extraction of lignin oligomers from wood biomass by microwave-assisted treatment with deep eutectic solvent [J]. *ChemSusChem*, 2017, 10: 1692-1700.
- [13] Wu G, Cheng Y, Huang C, *et al.* Deep eutectic solvent engineering: A novel ternary system for efficient lignocellulose extraction [J]. *Green Chemistry*, 2025, 27: 1556-1569.
- [14] Poy H, Lladosa E, Arcís A, *et al.* Microwave-assisted ternary deep eutectic solvent pretreatment for improved rice straw saccharification under mild pretreatment conditions [J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 206: 117639.
- [15] Duan C, Han X, Chang Y, *et al.* A novel ternary deep eutectic solvent pretreatment for the efficient separation and conversion of high-quality gutta-percha, value-added lignin and monosaccharide from *Eucommia ulmoides* seed shells [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 370: 128570.
- [16] Zhou Y, Liu Y, Lv Y, *et al.* Efficient extraction of *Eucommia ulmoides* gum by a deep eutectic solvent-organic solvent biphasic recyclable system [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 283: 138056.
- [17] 刘宁. 生物质基戊聚糖硫酸酯的制备及生物活性评价 [D]. 长春: 长春工业大学, 2024.
- [18] Xu J, Woodward A E. Further morphological studies of trans-1,4-polyisoprene crystallized from solution [J]. *Macromolecules*, 1986, 19: 1114-1118.
- [19] 刘奇, 于欢, 杨凤, 等. 杜仲胶与合成反式-1,4-聚异戊二烯等温结晶行为的对比研究 [J]. *高分子通报*, 2015(12): 71-79. ■