

# 类离子液体在纺织材料加工中的应用现状

袁久刚<sup>1</sup>, 付金凡<sup>1</sup>, 杨凡<sup>1</sup>, 周爱晖<sup>2</sup>, 季巧<sup>1</sup>, 王思翔<sup>1</sup>

(1. 江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 福建纤维检验中心, 福建 福州 350001)

**摘要:**介绍了类离子液体的定义、分类及其在纺织材料中的应用现状, 归纳总结了类离子液体在纤维素、木质素、蛋白质以及合成纤维等材料溶解、除杂、改性和染色加工中的应用, 讨论了类离子液体的回收方法, 并对类离子液体在纺织材料加工领域的发展进行展望。研究认为, 类离子液体是多种天然以及合成纤维材料加工的优良溶剂, 能够提高纺织材料的应用价值。

**关键词:** 类离子液体; 纤维素; 木质素; 蛋白质; 合成纤维

**中图分类号:** TS 102 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2024)04-0283-07

## Application Status of Pseudo Ionic Liquids in Textile Material Processing

YUAN Jiugang<sup>1</sup>, FU Jinfan<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, ZHOU Aihui<sup>2</sup>, JI Qiao<sup>1</sup>, WANG Sixiang<sup>1</sup>

(1. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Fujian Fiber Inspection Center, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** This paper introduced the definition, classification and application of pseudo ionic liquids in textile materials, and summarized the dissolution, impurity removal, modification and dyeing applications of pseudo ionic liquids in the processing of cellulose, lignin, protein and synthetic fibers. The recovery methods of pseudo ionic liquids were discussed, and the development of pseudo ionic liquids in textile material processing was prospected. It points out that pseudo ionic liquids are excellent solvents for processing many natural and synthetic fiber materials, which can improve the application value of textile materials.

**Key words:** pseudo ionic liquids, cellulose, lignin, protein, synthetic fiber

自1990年CATHCART C<sup>[1]</sup>提出“绿色化学”概念以来, 研究人员一直在寻找新型的绿色溶剂以代替常规有机溶剂。离子液体作为广受关注的绿色溶剂, 自20世纪90年代起<sup>[2]</sup>被广泛研究, 然而, 由于其制备过程需要用到大量有毒、可挥发的试剂, 且生物相容性差、难以降解, 使得离子液体的应用受到诸多限制。1999年, ABBOTT A P等<sup>[3]</sup>发现多种由季铵盐、金属无水氯化物、酰胺及醇类等形成的新型低共熔混合物, 这类物质具有易制备、成本低、无毒、可生物降解及可回收等优点, 且更为绿色环保, 因其物化性质与离子液体非常相似, 通常被称为类离子液体(pseudo ionic liquids, PILs), 也有学者将其称为低共熔溶剂、低共熔混合物、离子液

体类似物等<sup>[4]</sup>。类离子液体最早被应用于金属电沉积领域和电抛光领域, 后作为反应介质应用于生物质分离、聚合物生产和电化学等领域<sup>[5]</sup>, 也在材料加工领域得到应用<sup>[6]</sup>。

## 1 类离子液体的分类及主要应用领域

类离子液体由两种或两种以上组分组成, 包含氢键供体(hydrogen bond donor, HBD)和氢键受体(hydrogen bond acceptor, HBA)<sup>[7]</sup>。HBD与HBA混合后形成范德华力和氢键作用力, 破坏化合物晶格结构, 使混合物的熔点小于其任一组分的熔点。根据配位剂的性质, 可以将类离子液体分为4类,

收稿日期: 2024-03-01; 修订日期: 2024-05-08。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31771039)。

作者简介: 袁久刚(1982—), 男, 教授, 硕士生导师。主要研究方向为天然纤维的提取及功能化改性。

Email: jiugangyuan@jiangnan.edu.cn

具体见表 1<sup>[8-9]</sup>。

表 1 类离子液体的分类

类型	组分		举例
	HBD	HBA	
I	非水合金属卤化物	季铵盐	AlCl <sub>3</sub> -氯化胆碱
II	水合金属卤化物	季铵盐	CrCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O-氯化胆碱
III	氢键供体	季铵盐	尿素-氯化胆碱
IV	氢键供体	金属卤化物	乙二醇-ZnCl <sub>2</sub>

研究显示,类离子液体在纤维素、木质素、角蛋白、丝蛋白以及合成纤维等多种纺织材料加工上显示出极大的优势<sup>[10]</sup>,其主要应用领域如图 1<sup>[10-11]</sup>所示。

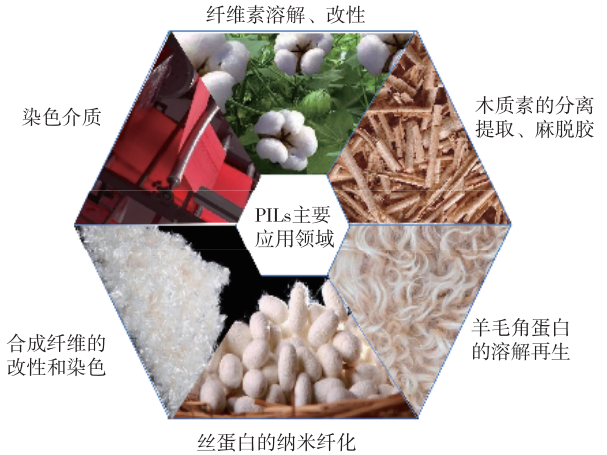


图 1 类离子液体在纺织材料加工领域的应用

Fig. 1 Application of pseudo ionic liquids in the field of textile material processing

## 2 类离子液体在纤维素加工中的应用

### 2.1 制备纳米纤维素

纤维素具有线性有序的稳定结构,其聚合度高,不溶于水和一般有机溶剂<sup>[12]</sup>。类离子液体的阴离子能够与纤维素羟基缺电子基团上的氢原子发生电子诱导效应,破坏纤维素的分子间氢键,促进其溶解;同时,类离子液体可以与纤维素重新建立氢键<sup>[13]</sup>。表 2<sup>[3,14]</sup> 为部分类离子液体对纤维素的溶解能力。由表 2 可以看出,氯化胆碱类对纤维素的溶解作用较强,尤其是硫脲-氯化胆碱体系,在 100 ℃ 下纤维素被溶解组分的质量分数高达 10%。

利用类离子液体对纤维素氢键的破坏作用,可以促使纤维素发生物理解纤,从而快速制备纤维素纳米纤丝 (cellulose nanofibril, CNF)<sup>[15]</sup>。制备 CNF 时,类离子液体先溶解并去除部分半纤维素,再渗透到纤维素微纤丝内部,破坏纤维部分氢键,使微

纤丝间结构变得松弛,以提高物理解纤过程中的分丝帚化效率。SIRVIÖ J A 等<sup>[16]</sup> 使用尿素-氯化胆碱处理漂白桦木浆,并通过微射流机械处理成功制备出 CNF (见图 2)。此外,微波、化学催化、超声等辅助手段有助于后续纳米纤化,通过这些物理解纤方法,可使类离子液体用于工业废弃棉织物的回收利用<sup>[17]</sup>。废弃棉织物经过类离子液体预处理和球磨处理后,可以快速制备出纳米原纤化纤维素,实现废弃资源高值化利用。

表 2 部分类离子液体对纤维素的溶解能力

组分		物质的量比	温度/℃	溶解组分的质量分数/%
HBD	HBA			
苹果酸	丙氨酸	1:1	100	0.1
苹果酸	甘氨酸	1:1	100	0.1
苹果酸	脯氨酸	1:2	100	0.2
苹果酸	脯氨酸	1:3	100	0.8
草酸	脯氨酸	1:1	60	0.2
草酸	组氨酸	9:1	60	0.2
甘油	氯化胆碱	2:1	100	3.0
硫脲	氯化胆碱	2:1	100	10.0
尿素	氯化胆碱	2:1	100	8.0
尿素	溴化胆碱	2:1	100	5.0
尿素	盐酸甜菜碱	4:1	100	2.5
尿素	己内酰胺	1:3	120	2.8
尿素	乙酰胺	1:2	120	1.0
尿素	乙酰胺	1:1	120	1.8

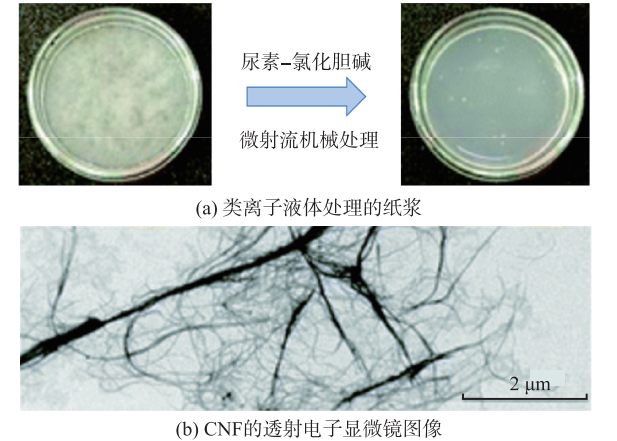


图 2 类离子液体制备 CNF

Fig. 2 Preparation of CNF by pseudo ionic liquids

### 2.2 纤维素功能化改性

2.2.1 纤维素的阳离子化改性 类离子液体体系的 HBA 组分可以作为阳离子化试剂对纤维素进行阳离子化改性。采用类离子液体对纤维素进行阳离子化改性,具有反应过程高效、试剂体系简单、无毒等优点。已经应用的阳离子化改性体系有尿素-氯化胆碱、甘油-盐酸甜菜碱、硼酸-缩水甘油三甲

基氯化铵、甘油-盐酸氨基胍等<sup>[18-20]</sup>。YANG Z H 等<sup>[18]</sup>使用尿素-氯化胆碱对纤维素进行阳离子修饰,修饰后的纤维素可以提升对阴离子染料的吸附性,其改性过程如图 3<sup>[18]</sup>所示。

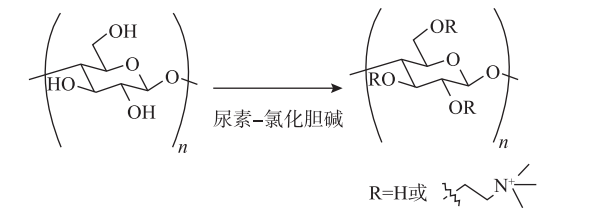


图 3 尿素-氯化胆碱对纤维素进行阳离子化改性  
Fig. 3 Cellulose was cationized by urea/choline chloride

采用活性染料染棉时上染率较低,且染料中含有大量无机盐,会造成环境污染。通过阳离子化改性可以使纤维素与染料间的排斥力下降,提升纤维对阴离子染料的吸附性,提高染料利用率,且无需使用无机盐,对环境更友好。例如,WEI Y M 等<sup>[21]</sup>使用薄荷醇和百里香酚形成的类离子液体体系代替以水为染色介质的传统体系,用于棉织物染色。类离子液体体系在不加盐的情况下能达到与传统体系相似的染色质量,但是该体系的染色成本远高于传统体系,需要较高的溶剂体系重复利用率才可以显著降低成本,且对染料种类也有一定限制。

**2.2.2 纤维素的酯化改性** 纤维素过强的亲水性限制了其在生产生活中的应用。酯化改性后,纤维疏水性提高,纤维间氢键作用减弱,织物不易产生褶皱,且纤维在复合材料制备过程中的界面相容性得到提高<sup>[22]</sup>,从而拓宽纤维素的应用领域。

类离子液体体系的 HBD 组分可以用于纤维素酯化改性。经类离子液体高度润胀后,有机酸更容易渗透到纤维素内部,使酯化效率提高。目前,常用的 HBD 有机酸包括乳酸、二水合草酸、乙酸等。WILLBERG-KEYRILÄINEN P 等<sup>[23]</sup>采用尿素-盐酸甜菜碱、尿素-甜菜碱及尿素-氯化胆碱 3 种不同的类离子液体对纤维素进行处理,反应机理如图 4 所示。这种类离子液体可用于合成氮含量可控的氨基甲酸酯纤维素,该过程在低温下进行且无需添加其他溶剂。

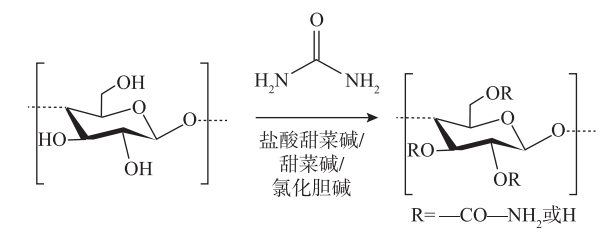


图 4 合成氨基甲酸酯纤维素的机理  
Fig. 4 Mechanism of synthesis of cellulose carbamate

### 3 类离子液体在木质素加工中的应用

#### 3.1 分离提取木质素

木质素是自然界中一类储量丰富的芳香族聚合物<sup>[24]</sup>,经化学改性可制备高附加值化学品,但木质素在普通溶剂中的溶解度很低<sup>[25]</sup>,因此限制了木质素的分离及应用。类离子液体体系中的 HBD 和 HBA 会发生相互作用,为类离子液体提供温和的酸碱催化环境,其 HBD 可选择性地断开苯基丙烷单元之间的醚键连接,从而使木质素解聚或分离。部分类离子液体对木质素的溶解能力见表 3<sup>[7,26]</sup>。

表 3 部分类离子液体对木质素的溶解度  
Tab. 3 Solubility of lignin in some pseudo ionic liquids

组分		物质的 量比	温度/℃	溶解组分的 质量分数/%
HBD	HBA			
苹果酸	氯化胆碱	1:1	100	3.40
苹果酸	脯氨酸	1:2	100	6.09
苹果酸	脯氨酸	2:1	100	14.90
乳酸	氯化胆碱	2:1	60	5.38
乳酸	氯化胆碱	5:1	60	7.77
乳酸	氯化胆碱	10:1	60	11.28
乳酸	丙氨酸	9:1	60	8.47
乳酸	甘氨酸	9:1	60	8.77
乳酸	组氨酸	9:1	60	11.82
乳酸	甜菜碱	2:1	60	12.03
草酸	氯化胆碱	1:1	60	3.62

FRANCISCO M 等<sup>[27]</sup>系统研究了木质素在类离子液体中的溶解情况,发现由羧酸和季铵盐组成的类离子液体可以很好地溶解木质素。KROON M C 等<sup>[28]</sup>和 LYNAM J G 等<sup>[29]</sup>使用甲酸-氯化胆碱、乳酸-氯化胆碱和乳酸-甜菜碱等类离子液体溶解木质素,证实了其可以选择性溶解木质素。改变类离子液体中 HBD 和 HBA 的种类或两者之间的物质的量比,可以影响类离子液体对木质素的提取率<sup>[30]</sup>。类离子液体的酸强度或碱强度越高,对木质素的溶出率也越大<sup>[31]</sup>。此外,原料的种类、类离子液体的水分含量、反应的温度和时间、微波和超声等辅助手段<sup>[32-34]</sup>都会对木质素分离提取产生一定影响。

#### 3.2 麻纤维脱胶

类离子液体对木质素具有溶解能力,因此在纤维脱胶方面也有相关应用。研究表明,尿素-氯化胆碱、乙二醇-乙胺盐酸盐以及咪唑-氯化胆碱对麻纤维表面的胶质均有较好的祛除效果<sup>[35]</sup>。苧麻纤维不同脱胶方法的对比见表 4<sup>[35-36]</sup>。与传统脱胶方法相比,类离子液体脱胶只需一步即可完成,生产效率和制成率高<sup>[36]</sup>,对环境更友好。

表 4 苎麻纤维不同脱胶方法的比较

Tab.4 Comparison of different degumming methods of ramie fibers

脱胶方法	化学试剂	时间/h	步骤	纤维强度/( cN/dtex)	残胶率/%	制成率/%
传统方法	酸、碱	7	3	≈7.0	<3	71
氧化脱胶	酸、碱、氧化剂	3	3	≈6.0	<10	80
类离子液体脱胶	尿素、氯化胆碱	2	1	≈6.5	<4	73

4 类离子液体在蛋白质加工中的应用

类离子液体有较强的拆散氢键的能力,某些类离子液体还具有还原性,可以有效破坏二硫键,从而溶解丝蛋白以及角蛋白<sup>[37-38]</sup>,这使其在蛋白质溶解和改性等方面有着广泛的应用。

4.1 制备丝素纳米纤维

利用类离子液体剥离丝素蛋白可制备丝素纳米纤维,该方法操作简单且可以较大程度上保留蚕丝纤维的独特结构。例如,张梦怡等<sup>[39]</sup>使用尿素-氯化胆碱对脱胶蚕丝进行预处理,溶剂渗入纤维断裂表面将其分割成细纤维,使纤维的光滑表面变得粗糙;同时,类离子液体渗入丝素蛋白纤维的缺陷处,使丝素蛋白纤维由长逐渐变短,再经超声和高速离心处理后,得到直径为 15 ~ 60 nm、轮廓长度为 2 ~ 10 μm 的丝素纳米纤维。

4.2 蛋白类纤维改性

4.2.1 真丝织物改性 类离子液体可以用于真丝织物改性。杨晟<sup>[40]</sup>使用乳酸-甜菜碱对真丝织物进行季铵化改性,甜菜碱的羧基与真丝织物的胺基发生酰胺化反应形成共价键,成功接枝到真丝织物表面。改性后真丝织物的表面电荷由 -26.35 mV 升高到 5.57 mV,织物结晶度由 71.57% 提高到 78.57%,断裂强度和断裂伸长率分别提高 2.8% 和 25%。使用活性红 3BF 染料对真丝织物进行染色,在较优染色工艺(染液中 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 质量浓度为 2 g/L,染色温度 50 ℃,染色时间 80 min)条件下,上染率从 1.37% 提高到 79.53%,织物 K/S 值由 0.075

提升至 4.071。经过改性,织物的拉伸强度和微观形貌变化不大,织物吸水性、透气性等穿着舒适性不受影响。

4.2.2 羊毛纤维改性 类离子液体具有溶解性能,可以在短时间内溶解羊毛纤维表面的角质层,改善羊毛表面性能,如润湿性、防毡缩性和染料吸收性<sup>[41]</sup>。BOOSTANI B 等<sup>[42]</sup>使用尿素-氯化胆碱代替传统的含氯防毡缩化学品,用于羊毛的防毡缩整理,发现其防毡缩效果与传统工艺相似,且几乎没有降低羊毛的机械强度,还可有效改善羊毛经含氯化学品整理后的泛黄问题,提高了羊毛织物的品质和服用性。该方法成本低且对环境友好,在纺织工业和其他蛋白质改性工艺中具有很大的应用潜力。

4.3 蛋白类织物无水染色

类离子液体可作为无水染色的溶剂,染色过程只需染料和类离子液体<sup>[43]</sup>,无需其他助剂。以羊毛为例,染色过程中,类离子液体既作染浴又作促染助剂,其与羊毛角蛋白的各种作用力有助于染料的上染。其作用力包括:①类离子液体的氯离子与角蛋白分子氨基之间的氢键作用力;②类离子液体的羧酸基与角蛋白正胺离子之间的离子键作用力;③类离子液体的季铵盐与角蛋白羧酸基之间的离子键作用力。

类离子液体染色法与传统以水为载体的染色法相比,染色后羊毛样品色牢度相似,但颜色更深,染色效果的比较结果见表 5<sup>[43]</sup>。染色后,类离子液体可作为清洗溶剂,去除黏附在织物表面的多余染料,含染料的溶剂可重复使用至少 10 次。

表 5 类离子液体法和常规水法对羊毛样品的染色效果比较

Tab.5 Comparison of dyeing effect of pseudo ionic liquids method and conventional water method on wool samples

染料	载体	K/S 值	织物干摩擦牢度	织物湿摩擦牢度	耐洗牢度	耐光牢度
酸性黄 19	水	13.2	4 ~ 5	4	4 ~ 5	5
	类离子液体	15.6	4 ~ 5	4	4 ~ 5	5
酸性红 57	水	19.6	4 ~ 5	4	4 ~ 5	5
	类离子液体	23.5	4 ~ 5	4	4 ~ 5	5
酸性蓝 92	水	11.2	4 ~ 5	4	4 ~ 5	5
	类离子液体	13.5	4 ~ 5	4	4 ~ 5	5

## 5 类离子液体在合成纤维加工中的应用

合成纤维一般具有高度疏水性,容易产生静电,服用性能不佳,而类离子液体能够破坏纤维原有的氢键,由表及里溶解刻蚀纤维,改变纤维的化学成分和结构,拓宽其应用领域。涤纶亲水性差,ZHANG Y Y 等<sup>[44]</sup>利用草酸-氯化胆碱体系对涤纶进行改性,在 60 ℃ 下处理 2 h 后,织物表面形貌变得粗糙,纤维极性也因溶剂的溶胀和化学作用而增强;改性后,涤纶织物的氧含量及羟基含量增加,表面形成裂纹和气孔,织物的亲水性提高,且表现出优异的抗静电性和染色性。锦纶与涤纶一样,吸湿性较差,易产生静电,酶法改性能够提高其亲水性并保持纤维的机械性能,但改性效果有限。汪慧怡等<sup>[45]</sup>发现乙二醇-氯化胆碱能够直接对锦纶进行刻蚀,协同酶的水解作用,提升织物表面粗糙度,改善其亲水性,使其服用性能提高。聚乳酸纤维亲水性及耐热性差,印染加工受限。应丽丽<sup>[46]</sup>研究发现,草酸-氯化胆碱体系能够增加聚乳酸分子链上的极性位点,催生纤维表面微观形貌及化学结构的变化,实现聚乳酸纤维的表面再造,提升其染色深度、速度以及上染率,且该过程不损伤聚乳酸聚集态结构。

此外,类离子液体还可以用作合成纤维的染色介质。PAWAR S S 等<sup>[47]</sup>使用尿素-氯化胆碱体系对涤纶进行染色,与传统染色相比,该方法减少了废水的排放和染色助剂的消耗,且涤纶织物的  $K/S$  值、染色牢度等与传统染色相当;但是,类离子液体作为染色介质的成本较高,其回收和后续染色应用还有待进一步研究。

## 6 类离子液体的回收利用

类离子液体在纺织材料加工中能否可持续应用,其重要影响因素是类离子液体的回收利用。通常,类离子液体的回收不涉及化学反应,只涉及 HBD 与 HBA 之间氢键的形成或断裂,回收过程较简单。

回收类离子液体有多种方法,常用的有旋转蒸发法、膜分离法和电渗析法等<sup>[48]</sup>。旋转蒸发法操作简单,是较常用的一种方法,多次回收得到的类离子液体对材料仍具有较好的处理效果,但是随着循环次数的增加,回收效果会变差,且加工过程能耗

高。膜分离法能耗低且不需要溶剂,其通过纳米过滤与反渗透等手段过滤除去类离子液体中的水,但对于浓缩后的类离子液体而言,渗透压是分离纯化类离子液体的主要限制因素。电渗析技术与超滤技术结合,能够去除类离子液体中的降解产物,实现类离子液体的高效回收;超滤技术可以对类离子液体进行高效过滤,该技术将过滤后的类离子液体进行稀释,再使用电渗析技术在体系中外加电场,通过离子交换膜将类离子液体的各组分分离。在实际回收类离子液体时,要考虑回收的成本、能耗,并结合工艺流程和对溶剂的具体要求来选择合适的回收方式。

## 7 结 语

类离子液体作为一种新型的绿色溶剂,凭借其可设计性强、安全无毒、不易挥发、可降解、制备成本低等特性,成为多种天然以及合成纤维材料加工的优良溶剂,且经类离子液体处理后的纺织材料应用价值提高。但其相关研究仍处于初始阶段,许多问题值得进一步探究,如寻找能够低成本且高效溶解纤维素的方法,探究类离子液体溶出木质素的机理以及类离子液体的高效回收途径等。

### 参考文献:

- [1] CATHCART C. Green chemistry in the Emerald Isle[J]. Chemistry and Industry, 1990(11): 684-687.
- [2] 李燕. 基于咪唑类离子液体的新型能源膜材料研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [3] ABBOTT A P, MCKENZIE K J. Application of ionic liquids to the electrodeposition of metals[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2006, 8(37): 4265.
- [4] 赵晶晶. 乙酰胺类低共熔离子液体的性质及其在烟气脱硫中的应用[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2015.
- [5] GUO W J, HOU Y C, WU W Z, et al. Separation of phenol from model oils with quaternary ammonium salts via forming deep eutectic solvents[J]. Green Chemistry, 2013, 15(1): 226-229.
- [6] HUANG Y, SHEN F, LA J, et al. Synthesis and characterization of CuCl nanoparticles in deep eutectic solvents[J]. Particulate Science and Technology, 2013, 31(1): 81-84.
- [7] ABBOTT A P, CAPPER G, DAVIES D L, et al. Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures[J]. Chemical Communications, 2003(1): 70-71.
- [8] LOOW Y L, NEW E K, YANG G H, et al. Potential use



- of deep eutectic solvents to facilitate lignocellulosic biomass utilization and conversion[J]. *Cellulose*, 2017, 24(9): 3591-3618.
- [9] SMITH E L, ABBOTT A P, RYDER K S. Deep eutectic solvents ( DESs ) and their applications [ J ]. *Chemical Reviews*, 2014, 114(21): 11060-11082.
- [10] 张亦可. 低共熔溶剂辅助羊毛角蛋白提取及其应用 [ D ]. 上海: 东华大学, 2021.
- [11] 苑超. 改性角蛋白浓缩液的制备及应用 [ D ]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [12] AGBOR V B, CICEK N, SPARLING R, et al. Biomass pretreatment: fundamentals toward application [ J ]. *Biotechnology Advances*, 2011, 29(6): 675-685.
- [13] 陈子澍, 赵子暄, 张绍蒙, 等. 季铵盐/酰胺类低共熔溶剂的制备及其对纤维素的溶解性能 [ J ]. *林产化学与工业*, 2018, 38(5): 93-99.
- CHEN Zishu, ZHAO Zixuan, ZHANG Shaomeng, et al. Effect of hydrogen bonding of ammonium-based deep eutectic solvents on cellulose dissolution [ J ]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2018, 38(5): 93-99. (in Chinese)
- [14] SHARMA M, MUKESH C, MONDAL D, et al. Dissolution of  $\alpha$ -chitin in deep eutectic solvents [ J ]. *RSC Advances*, 2013, 3(39): 18149-18155.
- [15] 杜海顺, 刘超, 张苗苗, 等. 纳米纤维素的制备及产业化 [ J ]. *化学进展*, 2018, 30(4): 448-462.
- DU Haishun, LIU Chao, ZHANG Miaomiao, et al. Preparation and industrialization status of nanocellulose [ J ]. *Progress in Chemistry*, 2018, 30(4): 448-462. (in Chinese)
- [16] SIRVIÖ J A, VISANKO M, LIIMATAINEN H. Deep eutectic solvent system based on choline chloride-urea as a pre-treatment for nanofibrillation of wood cellulose [ J ]. *Green Chemistry*, 2015, 17(6): 3401-3406.
- [17] 毛江淳. 利用废弃棉织物绿色制备纳米原纤化纤维素及其在水凝胶中的应用 [ D ]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [18] YANG Z H, ASOH T A, UYAMA H. Cationic functionalization of cellulose monoliths using a urea-choline based deep eutectic solvent and their applications [ J ]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, 160: 126-135.
- [19] HONG S, YUAN Y, LI P P, et al. Enhancement of the nanofibrillation of birch cellulose pretreated with natural deep eutectic solvent [ J ]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 154: 112677.
- [20] VUOTI S, NARASIMHA K, REINIKAINEN K. Green wastewater treatment flocculants and fixatives prepared from cellulose using high-consistency processing and deep eutectic solvents [ J ]. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, 26: 83-91.
- [21] WEI Y M, JIANG Z, WANG Q, et al. A salt-free and water-saving approach as a green alternative to conventional reactive dyeing of cotton [ J ]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2021, 24: 100536.
- [22] 何江, 王大威. 纤维素材料的改性与研究进展 [ J ]. *复合材料学报*, 2022, 39(7): 3121-3130.
- HE Jiang, WANG Dawei. Modification and research progress of cellulose materials [ J ]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(7): 3121-3130. (in Chinese)
- [23] WILLBERG-KEYRILÄINEN P, HILTUNEN J, ROPPONEN J. Production of cellulose carbamate using urea-based deep eutectic solvents [ J ]. *Cellulose*, 2018, 25(1): 195-204.
- [24] 曹双瑜, 胡文冉, 范玲. 木质素结构及分析方法的研究进展 [ J ]. *高分子通报*, 2012(3): 8-13.
- CAO Shuangyu, HU Wenran, FAN Ling. Progress in the structure of lignin and its analyzing methods [ J ]. *Polymer Bulletin*, 2012(3): 8-13. (in Chinese)
- [25] MOOD S H, GOLFESHAN A H, TABATABAEI M, et al. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment [ J ]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27: 77-93.
- [26] JABLONSKY M, SKULCOVÁ A, KAMENSKÁ L, et al. Deep eutectic solvents: fractionation of wheat straw [ J ]. *BioResources*, 2015, 10(4): 8039-8047.
- [27] FRANCISCO M, VAN DEN BRUINHORST A, KROON M C. New natural and renewable low transition temperature mixtures ( LTTMs ): screening as solvents for lignocellulosic biomass processing [ J ]. *Green Chemistry*, 2012, 14(8): 2153-2157.
- [28] KROON M C, CASAL M F, VAN DEN BRUINHORST A. Pretreatment of lignocellulosic biomass and recovery of substituents using natural deep eutectic solvents/compound mixtures with low transition temperatures: US20150094459 [ P ]. 2015-04-02.
- [29] LYNAM J G, KUMAR N, WONG M J. Deep eutectic solvents' ability to solubilize lignin, cellulose, and hemicellulose; thermal stability; and density [ J ]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 684-689.
- [30] SOARES B, TAVARES D J P, AMARAL J L, et al. Enhanced solubility of lignin monomeric model compounds and technical lignins in aqueous solutions of deep eutectic solvents [ J ]. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*

- ring, 2017, 5(5): 4056-4065.
- [31] TAN Y T, NGOH G C, CHUA A S M. Evaluation of fractionation and delignification efficiencies of deep eutectic solvents on oil palm empty fruit bunch [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 123: 271-277.
- [32] ASSANOSI A A, FARAH M M, WOOD J, et al. A facile acidic choline chloride-*p*-TSA DES-catalysed dehydration of fructose to 5-hydroxymethylfurfural [J]. RSC Advances, 2014, 4(74): 39359-39364.
- [33] YIIN C L, QUITAIN A T, YUSUP S, et al. Sustainable green pretreatment approach to biomass-to-energy conversion using natural hydro-low-transition-temperature mixtures [J]. Bioresource Technology, 2018, 261: 361-369.
- [34] TAN Y T, CHUA A S M, NGOH G C. Deep eutectic solvent for lignocellulosic biomass fractionation and the subsequent conversion to bio-based products—A review [J]. Bioresource Technology, 2020, 297: 122522.
- [35] 黄河. 苧麻“三素”的高效分离及纤维性能的改善研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [36] 聂凯. 基于低共熔溶剂的红麻纤维清洁制备研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [37] WANG D Y, TANG R C. Dissolution of wool in the choline chloride/oxalic acid deep eutectic solvent [J]. Materials Letters, 2018, 231: 217-220.
- [38] WANG D Y, YANG X H, TANG R C, et al. Extraction of keratin from rabbit hair by a deep eutectic solvent and its characterization [J]. Polymers, 2018, 10(9): 993.
- [39] 张梦怡. 低共熔溶剂法剥离制备丝素纳米纤维/纤维素纳米纤维及其湿敏性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
- [40] 杨晟. 基于水和低共熔溶剂的真丝织物季铵盐改性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- [41] JIANG Z, ZHANG N, WANG Q, et al. A controlled, highly effective and sustainable approach to the surface performance improvement of wool fibers [J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 322: 114952.
- [42] BOOSTANI B, BIDOKI S M, FATTABI S. Using an eco-friendly deep eutectic solvent for waterless anti-felting of wool fibers [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 386: 135732.
- [43] JIANG Z, CUI Y F, ZHENG G L, et al. An innovative, low-cost and environment-friendly approach by using a deep eutectic solvent as the water substitute to minimize waste in the textile industry and for better clothing performance [J]. Green Chemistry, 2022, 24 (15): 5904-5917.
- [44] ZHANG Y Y, YING L L, WANG Z Q, et al. Unexpected hydrophobic to hydrophilic transition of PET fabric treated in a deep eutectic solvent of choline chloride and oxalic acid [J]. Polymer, 2021, 234: 124246.
- [45] 汪慧怡, 李蓉, 卢雨正, 等. 低共熔溶剂对蛋白酶法亲水改性锦纶纤维的影响 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2024, 37(1): 10-18.
- WANG Huiyi, LI Rong, LU Yuzheng, et al. Effect of deep eutectic solvent on hydrophilic modified polyamide fiber by protease method [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2024, 37(1): 10-18. (in Chinese)
- [46] 应丽丽. 低共熔溶剂作用聚乳酸纤维的表面改性 with 功能化修饰研究 [D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2022.
- [47] PAWAR S S, ADIVAREKAR R. A novel approach for dyeing of polyester using non-aqueous deep eutectic solvent as a dyeing medium [J]. Pigment and Resin Technology, 2020, 50(1): 1-9.
- [48] 梁骁聪. 木质纤维素分离转化与离子液体回收工艺研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

(责任编辑:沈天琦)