泥炭藓纳米纤维素的制备及其在海藻酸钠复合膜中的应用研究

刘振华，谢玮*，程宁，甘晓婷
（柳州职业技术学院，广西 柳州 545006）

摘要：目的 选取泥炭藓作为苔藓植物门的代表植物，探讨以泥炭藓为原料制备纳米纤维素的可行性，考察制得的泥炭藓纳米纤维素在海藻酸钠复合膜中的应用性能，拓宽苔藓化学内含物的应用范围。**方法** 采用烧碱法提取泥炭藓中的纤维素成分，通过硫酸水解法将提取到的纤维素转化为纳米纤维素。采用 FTIR、XRD、热重、动态光散射、SEM 及 TEM 技术对制备的泥炭藓纤维素（Sph-C）和泥炭藓纳米纤维素（Sph-NC）进行表征，检测制备的 Sph-NC/海藻酸钠复合膜的力学性能。**结果** FTIR 分析显示，碱处理能够有效去除泥炭藓中的非纤维素杂质；XRD 检测显示，Sph-C 和 Sph-NC 中纤维素晶型均为纤维素 I；热重分析显示，Sph-NC 的热稳定性降低、固体残留率有所增加；TEM 观察显示 Sph-NC 直径约为 21.5 nm，属于纳米材料尺寸范畴。将 Sph-NC 用于海藻酸钠复合膜的制备，可将复合膜的抗张指数和耐破指数分别提高 21.2%和 15.7%。**结论** 泥炭藓可作为纤维素来源，用于制备纳米纤维素，制得的 Sph-NC 对海藻酸钠复合膜具有补强作用。

关键词：泥炭藓；纳米纤维素；表征；海藻酸钠；复合膜
中图分类号：TQ352.79 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-3563(2024)11-0065-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.11.007

Preparation of Sphagnum Nanocellulose and Its Application in Sodium Alginate Composite Films

LIU Zhenhua, *XIE Wei**, *CHENG Ning*, *GAN Xiaoting*
(Liuzhou Vocational & Technical College, Guangxi Liuzhou 545006, China)

ABSTRACT: The work aims to Select sphagnum as the representative plant of the Bryophyta, discuss the feasibility of preparing nanocellulose from Sphagnum, and investigate the application performance of the prepared Sphagnum nanocellulose in the sodium alginate composite films, so as to expand the potential applications of chemical inclusions in bryophytes. The cellulose component in Sphagnum was extracted by soda pulping, and further transformed into nanocellulose by sulfuric acid hydrolysis. The prepared Sphagnum cellulose (Sph-C) and Sphagnum nanocellulose (Sph-NC) were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), dynamic light scattering (DLS), scanning electronic microscope (SEM) and transmission electronic microscopy (TEM). The mechanical properties of the Sph-NC/sodium alginate composite film were tested. FTIR showed that the non-cellulose impurities could be effectively removed from the Sphagnum by the

收稿日期：2023-03-22
基金项目：柳州职业技术学院 2022 年高层次人才科研启动经费项目（2022GCQD12，2022GCQD13）；2024 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（2024KY1084）；柳州职业技术学院 2022 年大学生创新与创造项目（CXCZ2022A024）
***通信作者**

alkaline treatment. XRD showed that the crystalline forms of cellulose in Sph-C and Sph-NC were both cellulose I. In the TGA, Sph-NC showed reduced thermostability whereas a higher residual mass. TEM observations revealed that the diameter of the prepared Sph-NC was approximately 21.5 nm, falling within the range of nanomaterial sizes. The tensile index and bursting index of the sodium alginate composite films increased by 21.2% and 15.7%, respectively, upon the addition of Sph-NC during the preparation process. It is concluded that Sphagnum can be used as a source of cellulose to prepare nanocellulose and the prepared Sph-NC plays a reinforcing effect on the sodium alginate composite films.

KEY WORDS: Sphagnum; nanocellulose; characterization; sodium alginate; composite film

泥炭藓属（Sphagnum）植物下辖逾 300 余种，在分类上隶属苔藓植物门（Bryophyta），藓纲（Bryopsida），泥炭藓目（Sphagnales），泥炭藓科（Sphagnaceae），绝大多数分布于北半球的温带地区，我国尤以东北、西北及西南高寒沼泽地区分布较为广泛[1]。苔藓属于由水生到陆生的过渡类型植物，结构简单，不具维管组织，尚未形成木质纤维素结构。目前，关于泥炭藓化学组成的文献报道相对较少，但已经明确其含有大量果胶、纤维素、蛋白质等[2]。泥炭藓没有维管的分化，未鉴定到木质素的存在，但存在有与木素结构类似的多酚聚合物[3]。对泥炭藓的研究，学者主要集中在影响泥炭藓生长的非生物因子、泥炭藓涵水能力及与全球碳氮循环的关系等。在功能方面，泥炭藓主要用作名贵花卉的培养基质、园林景观材料等，但关于其化学内含物的应用还相对较少。以植物纤维素作为原料制备的纳米纤维素具有多项优异特性，包括高比表面积、高长径比、高抗张强度和刚度、低密度以及低热膨胀系数等，在生物医学工程、食品、传感器、包装、光电器件等领域获得了广泛的应用[4-5]。常规的纳米纤维素制备中，多以木本或草本植物为原料，鲜有以苔藓为原料制备纳米纤维素的报道，而且关于苔藓纤维素提取的研究也不多见。本研究开创性地从苔藓植物泥炭藓中提取纤维素，并通过硫酸水解法将其转化为纳米纤维素，最后将获得的纳米纤维素用于制备可降解的海藻酸钠复合膜材料。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料：鲜活泥炭藓购买自浙江兰亭青城科技有限公司，将其彻底清洗干净后置于烘箱中 50 ℃下烘干，粉碎后过 300 目筛得泥炭藓原料（图 1a），备用；透析袋，8 000~14 000 Da，美国 Viskase 公司；海藻酸钠，平均相对分子质量 250 kDa，天津永大试剂有限公司；其余用到的化学试剂均为分析纯。

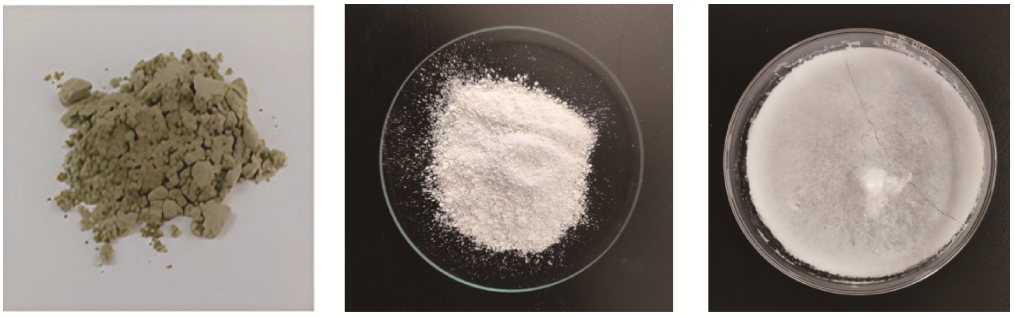
主要仪器：ZN-02L 型粉碎机，北京中科耐驰公司；C-MAGHS-7 型恒温磁力搅拌器，德国艾卡公司；C20 型水分测定仪，瑞士梅特勒托利多公司；DHG9053A 型鼓风干燥烘箱，上海一恒科学仪器公司；Scientz-IID 型超声波粉碎机，宁波新芝生物公司；4500 型高压反应釜，美国帕尔仪器公司；Centrifuge5424 型台式离心机，德国艾本德公司；SCIENTZ-12N 型冷冻干燥机，宁波新芝生物公司；JEM-2100 型透射电子显微镜，日本电子公司；TTM-300A 型立式拉力仪，杭州博科自动化公司；BSM-1600B 型耐破度仪，杭州博科自动化公司；iS5 型红外光谱仪（iD7 ATR），美国赛默飞世尔公司；SDT Q600 型热重分析仪，美国热分析仪器公司；D8 ADVANCE 型 X 射线分析仪，美国布鲁克公司；ZS90 型纳米粒径电位测定仪，英国马尔文公司；EVO 18 型扫描电镜，德国蔡司公司。

1.2 泥炭藓纤维素的制备

在 Parr 反应釜中，以料液比 1∶15 加入泥炭藓原料及质量分数 10%的 NaOH 溶液，在 140 ℃下搅拌处理 3 h，搅拌速度为 220 r/min。反应结束后，对悬浮液以 10 000 r/min 速度进行离心 10 min 处理，移去上清，用去离子水离心洗涤沉淀 3 次后，用盐酸溶液调节悬浮液的 pH 值至中性，离心，移去上清液，将沉淀干燥，称取 2 g 沉淀，加入 60 mL 去离子水后，重复 3 次加入 0.5 mL 冰醋酸及 0.6 g 亚氯酸钠，每次均置于 75 ℃水浴 1 h，冷却后离心清洗，对产物冷冻干燥得泥炭藓纤维素（图 1b）。

1.3 泥炭藓纳米纤维素的制备

称取冷冻干燥后的泥炭藓纤维素，按料液比 1∶15 加入质量分数为 60%的 H_2SO_4 溶液，转移至 45 ℃水浴，反应 60 min，加入 10 倍体积的去离子水，停止反应；以 10 000 r/min 速度离心悬浮液 10 min，收集沉淀并继续用去离子水离心洗涤至上清液 pH 值为 5 左右，移去上清液，收集沉淀物至透析袋，透析过程中每隔一段时间换入新的离子水，至透析液的 pH 值稳定；超声处理透析袋内的悬浮液 20 min（质量分数为 4 %、功率为 650 W、工作时间为 6 s、间隔时间为 3 s），冷冻干燥悬浮液，即可获得泥炭藓纳米纤维素（图 1c）。



a 泥炭藓原料（Sph）　b 泥炭藓纤维素（Sph-C）　c 泥炭藓纳米纤维素（Sph-NC）

图 1　Sph、Sph-C 与 Sph-NC 的图像
Fig.1 Images of Sph, Sph-C and Sph-NC

1.4　海藻酸钠复合膜的制备

采用溶液浇铸法制备海藻酸钠复合膜。将一定量的泥炭藓纳米纤维素分散于 200 mL 去离子水中，加入 0.232 g 甘油作为增塑剂，水浴加热到 60 ℃，加入 3.872 g 海藻酸钠，整个过程持续搅拌，得到状态均一的混合液，超声脱气 20 min，将混合液倾倒在干净的玻璃板模具（22 cm × 22 cm）上，转移至烘箱，于 90 ℃干燥 105 min。最后，将复合膜剥离并在温度为 25 ℃、相对湿度为 50%条件下平衡 48 h，进行后续测试。泥炭藓纳米纤维素的质量分数分别取 0.5%、1%、2%、4%（相对于海藻酸钠）。

1.5　表征

1.5.1　红外

样品的红外光谱分析采用美国赛默飞世尔公司 iS5 型红外光谱仪（iD7 ATR 附件）进行，扫描波数为 400~4 000 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}，扫描次数为 64 次。

1.5.2　XRD

样品的 XRD 谱图使用美国布鲁克公司 D8 Advance 型 X-射线分析仪测定。参数设定：电压为 40 kV，电流为 40 mA，扫描范围为 10°~60°，扫描方式连续扫描，扫描速度为 5（°）/min。依照文献[6]中经验公式计算样品的结晶度 I_{Cr}，见式（1）。

$$I_{Cr}=\left(\frac{I_{002}-I_{am}}{I_{002}}\right)\times 100\% \tag{1}$$

式中：I_{002} 为样品中结晶部分 002 面（2θ=22.6°）的结晶峰强度；I_{am} 为非结晶部分（2θ=18.0°）的峰强度。

1.5.3　热失重

氮气气氛下，使用美国热分析仪器公司 SDT Q600 型热重分析仪测试样品热失重曲线，取样量 5~10 mg，升温速率为 10 ℃/min。

1.5.4　粒度

Sph-NC 的粒径和 Zeta 电位使用英国马尔文公司 ZS90 型纳米粒径电位测定仪分析。根据文献[7]，参数设定如下：颗粒吸收率为 0.100，颗粒折射率为 1.470；分散剂水，分散剂折射率为 1.330，黏度为 0.887 2 mPa·s；系统温度为 25 ℃。Sph-NC 采用去离子水稀释，计数率为 150 千次/s。

1.5.5　SEM

将样品固定于样品台，采用溅射镀膜法对固定后的样品进行表面镀金，采用德国蔡司公司 EVO 18 型扫描电子显微镜观察，加速电压为 3 kV，工作距离（WD）为 8.5 mm。

1.5.6　TEM

Sph-NC 形貌使用日本电子公司 JEM-2100 型透射电镜观察，工作电压设置为 120 kV。制样过程：将 Sph-NC 稀释成质量分数为 0.05%的悬浮液，超声分散，取数滴滴在铜网上，干燥。Sph-NC 直径采用 ImageJ 软件统计分析。

1.5.7　力学性能

准备 3 张海藻酸钠复合膜，每张膜上切取 5 份尺寸为 200 mm×15 mm 的样品，按 GB/T 12914—2018 测试复合膜的抗张指数和断裂伸长率；每张膜剩余部分按 GB/T 454—2020 进行 3 次耐破指数测试，测试孔径为 32 mm。

1.5.8　水蒸气透过性能

参照文献[8]测试复合膜的水蒸气透过性能，取 3 张复合膜，每张膜上裁剪 3 份尺寸合适的样品，覆盖于大小为 4.6 cm×3.0 cm 盛有无水 $CaCl_2$ 的称量瓶上，密封好。将密封的称量瓶放置在干燥器中，保持干燥器内温度为 30 ℃、相对湿度 75%，按照设定的时间对称量瓶进行称量。

水蒸气透过系数 P_v[g·mm/(m^2·d·kPa)]，通过式（2）计算。

$$P=\frac{\Delta m\times d}{A\times t\times \Delta p} \tag{2}$$

式中：Δm 为在时间 t 内透过膜的水蒸气量，g；d 为膜厚度，mm；A 为膜面积，m^2；t 为测量时间，d；Δp 为膜两侧水蒸气压差，kPa。

2　结果与讨论

2.1　红外光谱分析

用红外光谱技术分析了泥炭藓原料、泥炭藓纤维素和泥炭藓纳米纤维素的化学结构，结果见图 2。泥炭藓原料成分较为复杂，除纤维素外，还含有大量的果胶、蛋白质、酚类等杂质，因此在泥炭藓原料的 1 765~1 480 cm^{-1} 吸收谱带内，除 1 630 cm^{-1} 处由纤维素引起的主吸收峰外，还含有大量的杂吸收峰，如 1 506 cm^{-1} 处有一明显的吸收峰，就是由于泥炭藓中蛋白质、酚类成分含有苯环结构的缘故。经过碱处理后，纤维素以外的成分大量去除，因此在 Sph-C 和 Sph-NC 的光谱图中，同样区间内的杂峰基本上都消失了。由于纤维素成分始终存在于样品中，因此 3 个样品在 1 500~900 cm^{-1} 吸收谱带内都能够观察到典型的纤维素的吸收峰，1 419、1 360、1 316、1 028、896 cm^{-1} 处的吸收峰与—CH_2、—CH、—OH、C—O 伸缩或弯曲振动有关[9]。此外，3 个样品谱图 3 333 cm^{-1} 和 3 300 cm^{-1} 处均可以观察到—OH 的吸收峰，1 599 cm^{-1} 处存在由样品中水分子引起的吸收峰，2 900 cm^{-1} 处为—CH 伸缩振动峰。

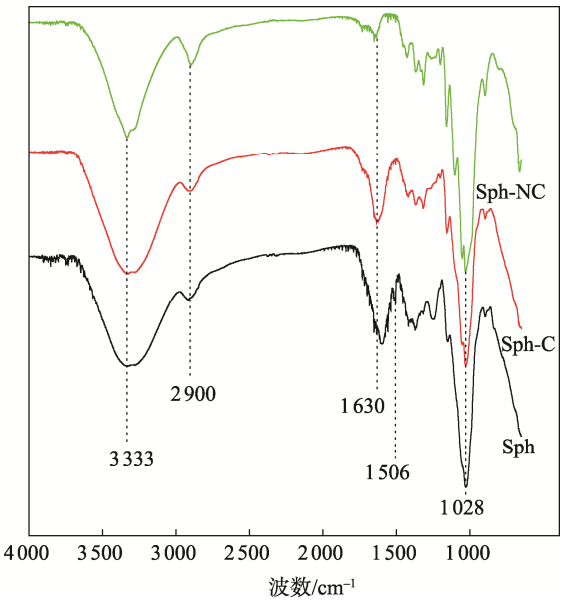


图 2　Sph、Sph-C 与 Sph-NC 的 FTIR 谱
Fig.2 FTIR spectrum of Sph, Sph-C and Sph-NC

2.2　X 射线衍射分析

通过 XRD 技术表征 Sph-C 及 Sph-NC 的晶体结构，结果如图 3 所示。在 2 个样品中，均可以观察到一系列明显的衍射峰，分别出现在 2θ=14.7°、16.4°、22.7°、34.6°处，以上衍射峰属于典型的纤维素 I 特征峰[10]，这说明 Sph-C 与 Sph-NC 中纤维素的晶型均为纤维素 I，而且在酸水解 Sph-C 制备 Sph-NC 的过程中，纤维素的晶型未发生明显变化。纤维素 I 是天然存在的纤维素形式，传统的烧碱法制浆从植物中分离得到的纸浆纤维素晶型一般为纤维素 I，这里利用烧碱从泥炭藓中分离制备泥炭藓纤维素亦符合这一规律。依据经验方程，结合 XRD 数据计算得出 Sph-C 的结晶度为 65.4%，Sph-NC 的结晶度为 73.9%。酸处理后，Sph-NC 的结晶度有所增加，推测是由于纤维素的无定形区大量水解所致。本研究以泥炭藓为原料制备的纳米纤维素的结晶度高于来源于海带渣（69.4%）的纳米纤维素[11]，但低于来源于稻谷壳（79%）和甘蔗渣（89%）的纳米纤维素[12]。

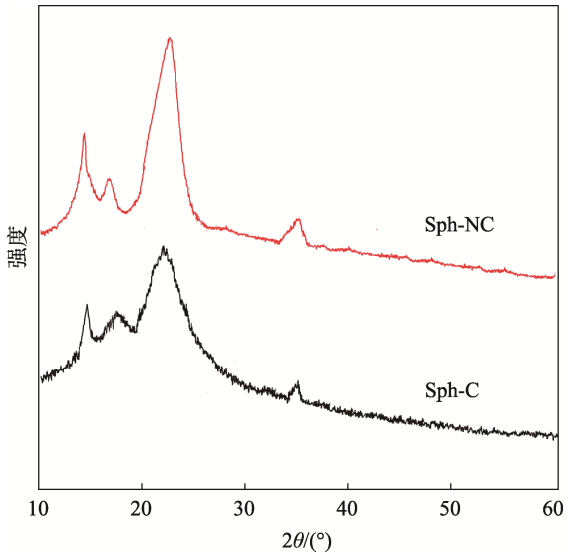
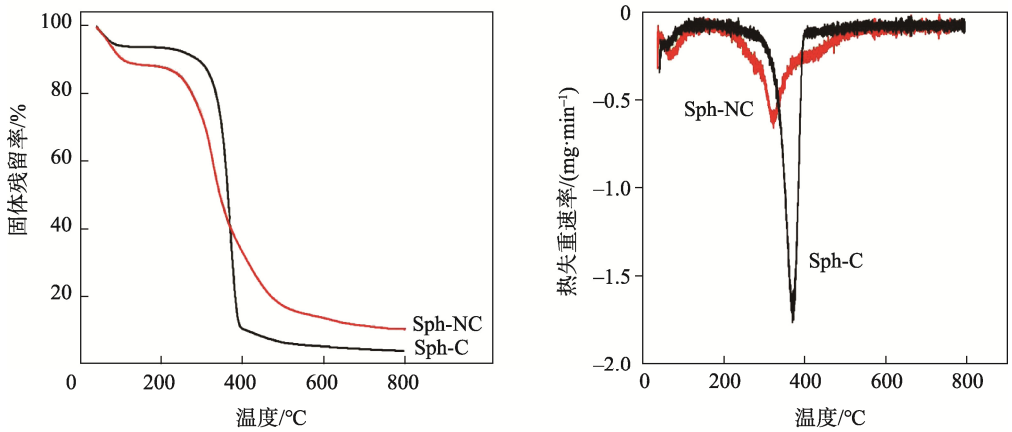


图 3　Sph-C 与 Sph-NC 的 XRD 谱
Fig.3 XRD patterns of Sph-C and Sph-NC

2.3　热稳定性分析

图 4 为 Sph-C 和 Sph-NC 的热失重（TG）曲线及热失重速率（DTG）曲线。2 个样品的 DTG 曲线均可以观察到 2 个明显的失重峰。这 2 个失重峰所对应的事件分别为：当温度小于 150 ℃时，样品失去自由水和吸着水；在温度区间 150~400 ℃，样品的纤维素发生糖苷键断裂、解聚、脱水、吡喃环断裂等一系列反应，同时生成 CH_4、CO、CO_2 等多种气态产物。结合 TG 与 DTG 曲线可以看出，150~400 ℃为样品的主要热失重区间，而且在这个环节，Sph-NC 的起始分解温度明显要低于 Sph-C 的。这可能是因为，相比 Sph-C，Sph-NC 颗粒的尺寸要小的得多，对热更敏感，在受热时更容易分解[13]。在热解终点（TG 曲线，800 ℃），Sph-NC 的固体残留率为 10.2%，高于 Sph-C 的固体残留率（4.0%）。对于此现象，认为其可能的原因有 2 个：一是酸水解提高了结晶区的比例，能够对热分解起到保护作用；二是酸水解在纤维素表面引入的硫酸基团妨碍了纳米纤维素的热分解[14]。



a TG曲线　　b DTG曲线

图 4　Sph-C 和 Sph-NC 的热失重（TG）曲线及热失重速率（DTG）曲线
Fig.4 TG and DTG curves of Sph-C and Sph-NC

2.4　粒径和 zeta 电位分析

采用动态光散射测定 Sph-NC 样品的粒径分布，结果如图 5 所示。制备得到的 Sph-NC 平均粒径为 419.0 nm，样品粒径均一，具有良好的单分散性。Zeta 电位测定结果显示，制得的 Sph-NC 的 Zeta 电位为−62.4 mV，这是由于在硫酸水解的过程中，硫酸会和纤维素大分子的羟基发生反应，在纤维素中引入硫酸基，而硫酸基是强阴离子基团。一般而言，当颗粒表面 zeta 电位绝对值大于 30 mV 时，颗粒可形成稳定的悬浮液[15]，Sph-NC 的 Zeta 电位绝对值远大于 30 mV，因此水悬浮液具有很好的稳定性，静置 48 h 后未观察到明显的沉降现象。

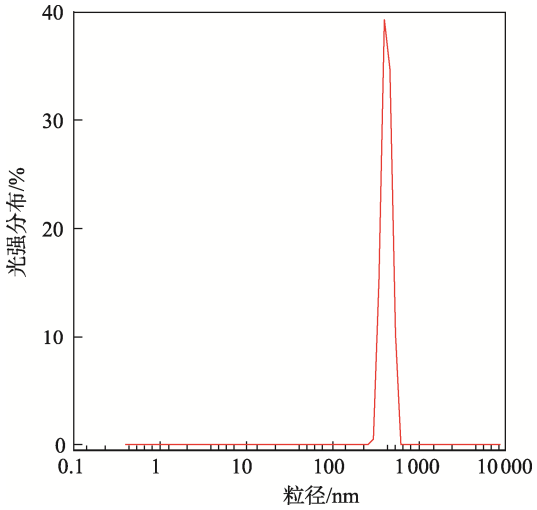


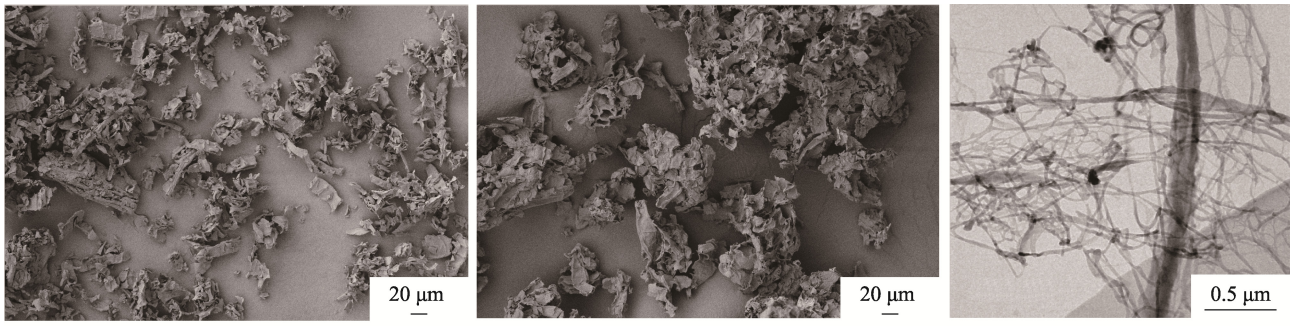
图 5　Sph-NC 的粒径分布曲线
Fig.5 Particle size distribution of Sph-NC

2.5　形貌分析

对泥炭藓原料和 Sph-C 的表面结构进行表征，结果分别见图 6a 和 6b。SEM 观察显示，泥炭藓原料与提取出的 Sph-C 均为较密实、表面粗糙的不规则颗粒。制浆造纸原料多为木材或草类，传统的化学制浆过程中，碱性条件能够去除复合胞间层的果胶、木素等成分，使原料中的纤维细胞彼此分开，因此制浆前后，物料的形态变化十分明显。与传统的制浆过程不同的是，纤维素分离前后，泥炭藓颗粒的形态变化不明显。这是由于泥炭藓中并不存在典型的植物纤维细胞，其细胞类型主要为薄壁细胞，尺寸接近于泥炭藓原料颗粒[16]，因此分离前后，泥炭藓颗粒的形态变化并不明显。图 6c 为 Sph-NC 的 TEM 图，制备得到的 Sph-NC 直径约为 21.5 nm，呈细长状，文献报道中采用硫酸水解制得的纳米纤维素，以棒状居多[17]，产生这种形态差异的原因可能是不同种属植物中纤维素大分子的聚集态有所不同。

2.6　复合膜力学性能

制备添加泥炭藓纳米纤维素的海藻酸钠复合膜，对复合膜的力学性能进行测试，结果如图 7 所示。不添加 Sph-NC 的海藻酸钠复合膜的抗张指数（TI）、耐破指数（BI）和断裂伸长率（EB）分别为 33.4 N·m/g、242.6 kPa·m^2/g 和 6.0%。制备的海藻酸钠复合膜的力学性能良好，其抗张指数和耐破指数与纸张相近[18]，同时具有较好的韧性（断裂伸长率值）。Sph-NC 的添加可以改善复合膜的 TI 和 BI，当 Sph-NC 的质量分数为 1%时，复合膜的 TI 和 BI 达到了最大值，分别为 40.5 N·m/g 和 280.6 kPa·m^2/g，比不添加 Sph-NC 的复合膜分别提高了 21.2%和 15.7%。添加纳米纤维素可以提高海藻酸钠复合膜的 TI 和 BI，前人的研究也得出了类似的结论[19]。当 Sph-NC 的质量分数大于 1%时，复合膜的 TI 和 BI 并没有随之提高，这可能是由于过量的 Sph-NC 之间产生了聚集，进而导致了应力的集中[20]。Sph-NC 中存在大量的纤维素结晶区，刚性较强，因此，随着 Sph-NC 用量的逐渐增加，复合膜的断裂伸长率呈下降趋势。



a Sph的SEM图　　b Sph-C的SEM图　　c Sph-NC的TEM图

图 6　Sph、Sph-C 与 Sph-NC 形貌图
Fig.6 Morphologies of Sph, Sph-C and Sph-NC

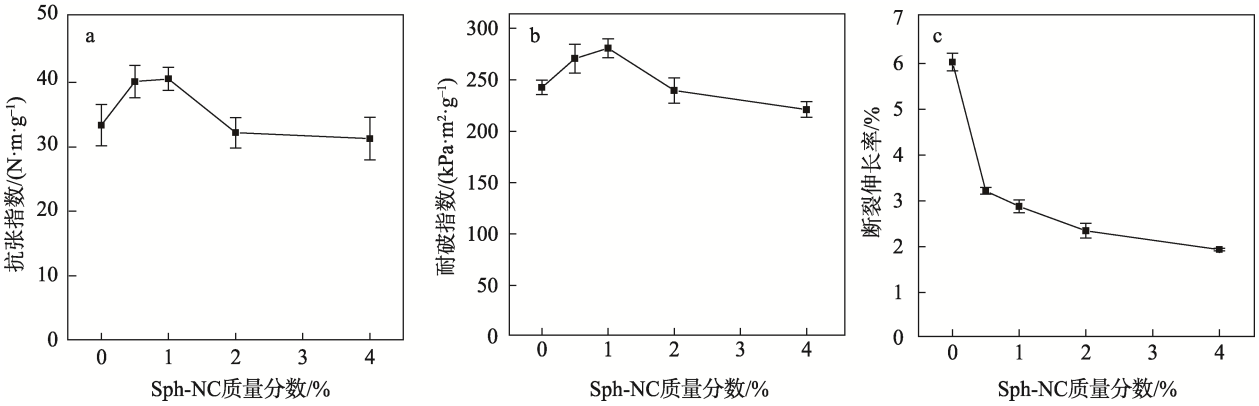


图 7　Sph-NC 用量对海藻酸钠复合膜力学性能的影响
Fig.7 Effect of Sph-NC dosages on mechanical properties of sodium alginate composite films

2.7　复合膜水蒸气透过性能

图 8 为 Sph-NC 用量对海藻酸钠复合膜水蒸气透过性能的影响。可以看出，在所考察的 Sph-NC 用量范围内，复合膜的水蒸气透过系数随着 Sph-NC 用量的增加而逐步降低。水蒸气透过系数是表征材料水蒸气透过性能的参数，该参数变小，说明 Sph-NC 的添加降低了材料的水蒸气透过性能。2.2 节 XRD 分析显示，Sph-NC 具有较高的结晶度（73.9%）。纤维素的结晶区，纤维素大分子排列整齐有序，氢键结合紧密，水分子难以渗入，高结晶度 Sph-NC 的添加，阻碍了水蒸气的透过，可能是海藻酸钠复合膜水蒸气透过性能下降的原因。相比未添加 Sph-NC 的复合膜，当 Sph-NC 的质量分数为 1%时，复合膜的水蒸气透过系数下降了 20.4%。

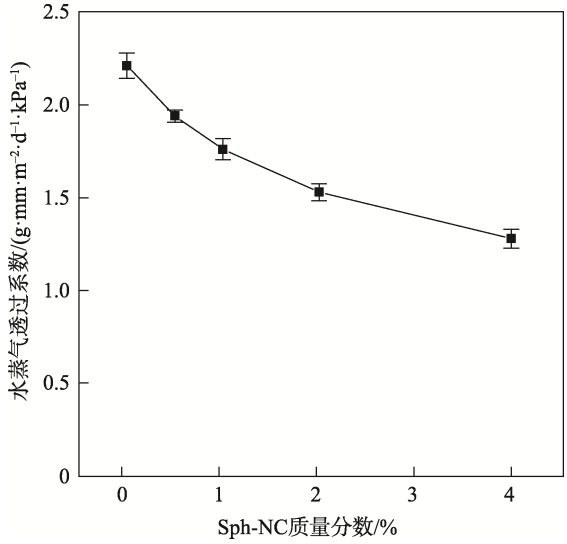


图 8　Sph-NC 用量对海藻酸钠复合膜水蒸气透过性能的影响
Fig.8 Effect of Sph-NC dosages on water vapor permeability of sodium alginate composite films

3　结语

本研究以泥炭藓为原料制备纳米纤维素，并对制备的纳米纤维素进行了表征。FTIR 分析显示，碱处理能够有效去除泥炭藓中的非纤维素杂质；XRD 检测显示，Sph-C 和 Sph-NC 中纤维素晶型均为纤维素 I；热重分析显示，Sph-NC 的热稳定性和固体残留率都有所增加；TEM 观察显示，Sph-NC 直径约为 21.5 nm，属于纳米材料尺寸范畴。结果表明，除常规的木本、草本植物外，泥炭藓亦可作为纤维素来源，用于制备纳米纤维素。将 Sph-NC 用作海藻酸钠复合膜的补强剂，复合膜的抗张

指数和耐破指数分别提高了 21.2%和 15.7%。本研究对泥炭藓内含物的利用进行了拓展，并制得了一种在包装领域具有潜在应用价值的海藻酸钠复合膜材料。

参考文献：

[1] 麻俊虎，彭涛，李大华. 中国泥炭藓属植物研究进展[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版)，2017，35(1): 114-120.
MA J H, PENG T, LI D H. Recent Advances of Sphagnum Plant Research in China[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2017, 35(1): 114-120.

[2] LIMPENS J, BOHLIN E, NILSSON M B. Phylogenetic or Environmental Control on the Elemental and Organo-Chemical Composition of Sphagnum Mosses?[J]. Plant and Soil, 2017, 417(1): 69-85.

[3] TSUNEDA A, THORMANN M N, CURRAH R S. Modes of Cell-Wall Degradation of SPHAGNUM FUSCUM by Acremonium cf. Curvulum and Oidiodendron Maius[J]. Canadian Journal of botany Journal Canadien de Botanique, 2001, 79(1): 93-100.

[4] 李慧，田家瑶，庞姗姗，等. 纳米纤维素晶体增强补强聚乙烯醇薄膜性能研究现状[J]. 包装工程，2023，44(3): 23-31.
LI H, TIAN J Y, PANG S S, et al. Research Status of Properties of CNC Reinforced PVA Films[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(3): 23-31.

[5] JI, Q ZHOU, C LI, Z , et al. Is Nanocellulose a Good Substitute for Non-Renewable Raw Materials? A Comprehensive Review of the State of the Art, Preparations, and Industrial Applications[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 202: 117093.

[6] MOHAMAD HAAFIZ M K, EICHHORN S J, HASSAN A, et al. Isolation and Characterization of Microcrystalline Cellulose from Oil Palm Biomass Residue[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 93(2): 628-634.

[7] 李现艳，胡阳，庄森炀，等. 一锅法制备羧基化纳米纤维素晶体[J]. 北京林业大学学报，2015，37(8): 105-111.
LI X Y, HU Y, ZHUANG S Y, et al. Preparation of Carboxylated Cellulose Nanocrystals via One-Pot Tandem Reactions[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(8): 105-111.

[8] 韩莹莹. 大豆分离蛋白基活性共混膜的制备与性能研究[D]. 哈尔滨：东北林业大学, 2018.
HAN Y Y. Preparation and Properties of Soybean Protein Isolate-Based Active Blend Membrane[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.

[9] HOSPODAROVA V, SINGOVSZKA E, STEVULOVA N. Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials[J]. American Journal of Analytical Chemistry, 2018, 9: 303-310.

[10] ESPINO E, CAKIR M, DOMENEK S, et al. Isolation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Industrial By-Products of Agave Tequilana and Barley[J]. Industrial Crops and Products, 2014, 62: 552-559.

[11] LIU Z H, LI X P, XIE W, et al. Extraction, Isolation and Characterization of Nanocrystalline Cellulose from Industrial Kelp (Laminaria Japonica) Waste[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 173: 353-359.

[12] KALLEL F, BETTAIEB F, KHIARI R, et al. Isolation and Structural Characterization of Cellulose Nanocrystals Extracted from Garlic Straw Residues[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 87: 287-296.

[13] 白有灿. 氯化胆碱类低共熔溶剂高效分离木质纤维素及纤维素组分的利用[D]. 广州：华南理工大学, 2018.
BAI Y C. Highly Efficient Isolation of Lignocellulose Components by Deep Eutectic Solvents and Cellulose Utilization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

[14] TRACHE D, HUSSIN M H, MOHAMAD HAAFIZ M K, et al. Recent Progress in Cellulose Nanocrystals: Sources and Production[J]. Nanoscale, 2017, 9(5): 1763-1786.

[15] FENG X, MENG X H, ZHAO J P, et al. Extraction and Preparation of Cellulose Nanocrystals from Dealginate Kelp Residue: Structures and Morphological Characterization[J]. Cellulose, 2015, 22(3): 1763-1772.

[16] SIMHAYOV R B, WEBER T K D, PRICE J S. Saturated and Unsaturated Salt Transport in Peat from a Constructed Fen[J]. Soil, 2018, 4(1): 63-81.

[17] JONOOBI M, OLADI R, DAVOUDPOUR Y, et al. Different Preparation Methods and Properties of Nanostructured Cellulose from Various Natural Resources and Residues: A Review[J]. Cellulose, 2015, 22(2): 935-969.

[18] LIU Z H, LI X P, XIE W. Carrageenan as a Dry Strength Additive for Papermaking[J]. PLoS One, 2017, 12(2): 0171326.

[19] WANG L F, SHANKAR S, RHIM J W. Properties of Alginate-Based Films Reinforced with Cellulose Fibers and Cellulose Nanowhiskers Isolated from Mulberry Pulp[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 201-208.

[20] 刘翠云，高喜平，黄宇，等. NCC 改性海藻酸钠可降解复合膜的制备及性能研究[J]. 化工新型材料，2015，43(6): 80-82.
LIU C Y, GAO X P, HUANG Y, et al. Preparation and Property of Nanocrystalline Cellulose/ Modified Alginate Based Biodegradable Composite Film[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(6): 80-82.