

· 研究论文 ·

## 浒苔纤维素基折纸蒸发器的制备及其海水淡化性能

吴吉进<sup>1</sup> 宋正廷<sup>1</sup> 胡文韬<sup>1</sup> 冯昌平<sup>1,2\*</sup> 杨洁<sup>2</sup> 杨伟<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup>青岛理工大学机械与汽车工程学院 山东增材制造工程研究中心 青岛 266520)

(<sup>2</sup>四川大学高分子科学与工程学院 先进高分子材料全国重点实验室 成都 610065)

**摘要** 太阳能驱动的海水淡化技术在解决全球淡水短缺方面拥有巨大的潜力,然而,长时间工作后的蒸发器普遍存在难回收与难降解的问题,严重影响技术的可持续应用能力.受纸可回收再利用和中国传统折纸工艺的启发,以浒苔纤维素为主要材料混合纸浆纤维制备了一种可回收的折纸蒸发器,引入石墨烯微片以增强其光热转换能力.在1个太阳光照强度下,蒸发器实现了 $2.20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的平均蒸发速率.户外实验结果证明其对海水具有优异的 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 去除能力,去除率超过99%.对蒸发器进行回收再制备后,再生蒸发器仍然具有 $1.95 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率.本工作不仅为高效海水淡化提供了新的结构启发,也为解决蒸发器的可持续性问题和中国沿海浒苔污染问题提供了新思路.

**关键词** 浒苔;纤维素;海水淡化;光热转换;可回收

**引用:** 吴吉进,宋正廷,胡文韬,冯昌平,杨洁,杨伟.浒苔纤维素基折纸蒸发器的制备及其海水淡化性能.高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.25330.

**Citation:** Wu, J. J.; Song, Z. T.; Hu, W. T.; Feng, C. P.; Yang, J.; Yang, W. Preparation of *Enteromorpha prolifera* cellulose-based foldable evaporator and its desalination performance. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.25330.

淡水资源作为维持人类身体健康和社会发展生产的不可或缺的资源,在我们的生活中起着重要的作用.然而,由于人口增长、气候变化、需求增加和污染等的综合影响,全球淡水资源和环境危机日益严重<sup>[1,2]</sup>.根据世界卫生组织(WHO)的数据全球目前有21亿人面临安全用水短缺的问题,8.44亿人生活在基本饮用水标准以下<sup>[3]</sup>.根据联合国发布的数据显示,预计到2050年全球人口将达到57亿,其中约有30%的人口将面临严重的水资源短缺的问题<sup>[4]</sup>.因此,日益需要一种有效的方法来应对这一问题.

海水淡化技术作为一种先进的水净化方法已经投入实际应用,如多级蒸馏<sup>[5]</sup>、离子交换<sup>[6]</sup>和反渗透<sup>[7]</sup>等,但这些海水淡化技术仍存在高能

耗、环境影响大和使用成本高等问题.在这一背景下,太阳能驱动的界面蒸发技术(ISDT),因其能够利用丰富且清洁的太阳能进行海水淡化被许多学者广泛研究<sup>[8-10]</sup>.然而现有蒸发器存在难回收与难降解等问题,可能会引发环境的二次污染<sup>[11]</sup>.因此,开发一种源自可再生资源且环境友好的蒸发器具有重要意义.

生物质材料纤维素,因其来源广泛、可生物降解和较好的亲水性等特点,为构建绿色蒸发器提供了良好的条件.浒苔(Ep)作为一种常见的海洋绿藻,其具有的丰富纤维素是构建绿色蒸发器的理想材料.并且日益加剧的海洋水体的富营养化,导致全球Ep的爆发频率和规模逐年增加,对海洋生态环境造成了巨大的负面影响<sup>[12]</sup>.因

2025-12-28收稿,2026-03-03录用, 网络出版.

基金项目:国家自然科学基金(基金号U23A20584).

\*通信联系人, E-mail: fengchangping@qut.edu.cn; weiyang@scu.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.25330; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7572

此, Ep的资源化利用, 也可以为Ep藻类问题提供一种可行的解决方法.

造纸术作为我国的四大发明之一, 发展至今已经非常成熟, 纸张基于纤维素之间亲水性官能团的氢键连接优势具有可回收性和重复利用的特点<sup>[13]</sup>. 鉴于此, 本工作将造纸术和折纸工艺相结合提出了一种基于浒苔纤维素(EC)的可回收折纸式太阳能蒸发器. 该蒸发器充分利用了EC的亲水特性, 并引入适量石墨烯微片(GNPs)实现了具有高吸光率(87.19%)和高蒸发速率( $2.08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )的性能. 其能够在1个太阳光下稳定工作1周(每天工作8 h), 维持 $2.20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的平均蒸发速率. 得益于纤维素之间的氢键网络结构, 该蒸发器在长时间工作或发生盐结晶失效后, 可以通过剪碎和再分散的方式实现回收再制备, 显著降低了蒸发器在实际应用中可能带来的二次污染风险. 并且回收再制备的蒸发器性能仍保持较高的水平, 平均蒸发速率可达 $1.95 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ .

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

浒苔, 收集自青岛黄海海岸, 将其洗净、晾干和粉碎后密封保存; 纸浆, 购于泛米科邦实验室科技(青岛)有限公司; 石墨烯微片, KNG-180-3, 购于厦门凯纳石墨烯技术股份有限公司; 氢氧化钠(分析纯), 购于青岛青科赛尔生物技术有限公司; 冰乙酸(99.5%)和次氯酸钠(有效氯 $\geq 20\%$ ), 购于济南西陆生物技术有限公司.

### 1.2 实验设备

集热式磁力搅拌器: DF-101S, 上海力辰邦西仪器科技有限公司; 真空冷冻干燥机, FD-1A-50+, 湖南湘仪博医康科技有限公司; 拉压试验机, LDW-5KN, 广州得仪检测设备有限公司; 氙灯, CEL-PE300L, 北京中教金源科技有限公司; 光密度计, CEL-FZ-A, 北京中教金源科技有限公司; 傅里叶变换红外光谱仪: Nicolet iS20, 美国 Thermo Fisher Scientific; 扫描电子显微镜(SEM): Sigma 360, 德国 ZEISS; 光学接触角测量仪: CAM-101, 芬兰 KSV 仪器有限公司; 紫外可见近红外漫反射测试仪: UV-3600i Plus, 日本 Shimadzu; 电感耦合等离子体光学电子能谱仪: 5110, 美国 Agilent.

### 1.3 EC的提取

在前人的基础上按照酸碱法提取EC<sup>[14]</sup>. 简而言之, 将60 g浒苔粉末(Epp)在90 °C下用2.4 L的4 wt% NaOH溶液进行碱处理6 h, 然后用去离子水洗涤至中性, 该过程去除蛋白质和半纤维素. 随后, 向800 mL去离子水中加入8 mL乙酸和6 g NaClO和碱处理后的Epp, 在60 °C下处理4 h, 该过程旨在去除叶绿素. 最后, 通过去离子水洗涤至中性并用抽滤瓶抽滤后得到EC. 将一部分抽滤后的EC放入真空冷冻干燥机以去除其水分, 称取其前后质量变化得到其质量分数为7.4%.

### 1.4 纤维素折纸(EGNPs)蒸发器的制备

具体制备流程如图1所示. 取9 g EC加入200 mL去离子水中, 于油浴锅中90 °C磁力搅拌1 h之后, 取0.1 g纸浆(PP)加入上述溶液搅拌1 h, 使其混合均匀. 分别取0、0.01、0.03和0.05 g GNPs加入上述溶液, 室温搅拌2 h, 之后, 将其倒入模具风干, 得到纤维素折纸(EGNPs). 最后, 通过折纸的方式将其折叠成花状蒸发器, 分别命名为EGNPs0、EGNPs1、EGNPs3和EGNPs5.

### 1.5 测试与表征

#### 1.5.1 微观形貌观察及元素分析

采用扫描电子显微镜对喷金后的样品进行分析, 加速电压为10 kV.

#### 1.5.2 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

采用傅里叶变换红外光谱对样品进行红外光谱扫描. 分辨率为 $4 \text{ cm}^{-1}$ , 扫描次数为32次.

#### 1.5.3 拉伸性能测试

将纸张裁切为 $80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 采用小型拉压试验机对其拉伸性能进行测试.

#### 1.5.4 亲水性分析

采用光学接触角测量仪对样品的接触角进行测量.

#### 1.5.5 光吸收能力分析

采用紫外可见近红外漫反射(UV-Vis-NIR)测试来分析样品的光吸收能力, 测试范围为200~2500 nm.

#### 1.5.6 水蒸发实验

采用CEL-PE300L氙灯(AM1.5)模拟日光, 进行水分蒸发实验. 光垂直照射在蒸发器表面, 实验在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的太阳强度下进行. 蒸发实验在温度为20~25 °C, 相对湿度为50%~60%的条件下进行. 用聚氨酯泡沫为蒸发器提供浮力支撑,

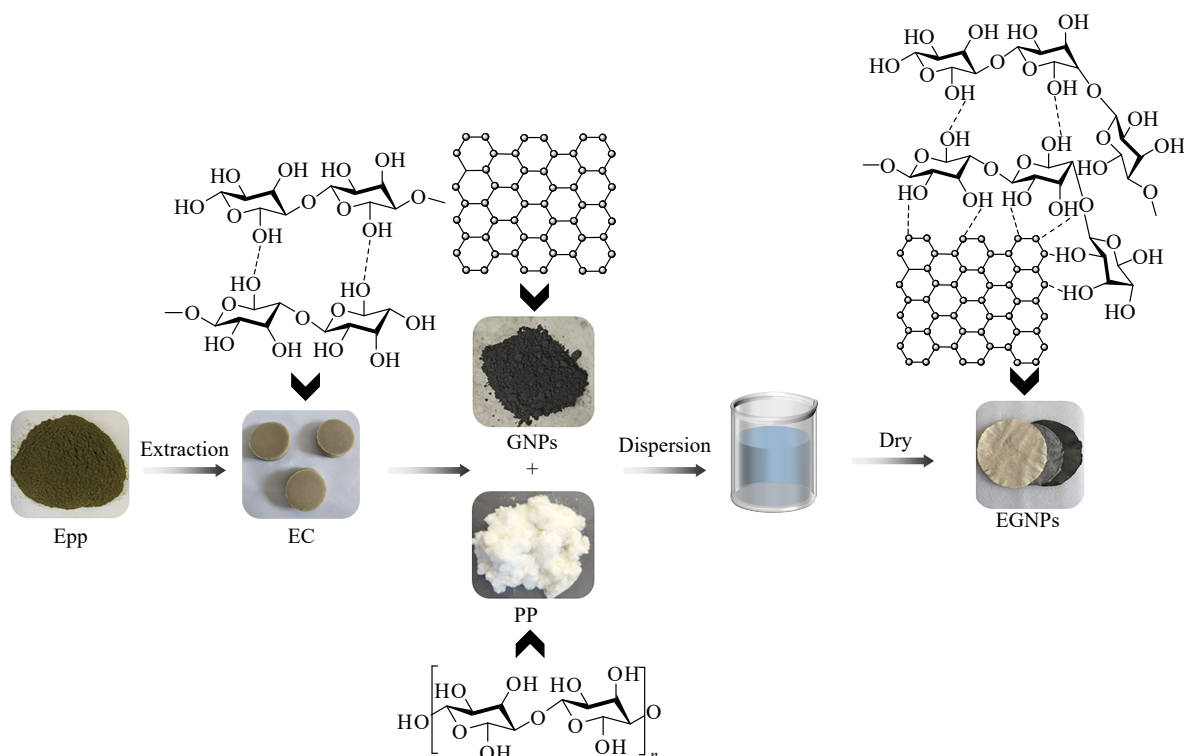


Fig. 1 Flowchart for the preparation of the EGNPs.

吸水棉为蒸发器输送水，放于烧杯中进行蒸发实验。利用光密度计(CEL-FZ-A)调节蒸发层表面的光照强度。利用分析天平(精度：0.1 mg)记录水的质量变化。使用热电偶和红外热成像仪测量器件表面温度。其中，实验所采用的海水收集自青岛金沙滩。

蒸发器的蒸发速率由下式估算<sup>[15]</sup>：

$$v = \frac{\Delta m}{s \times t} \quad (1)$$

式中， $v$ 为蒸发速率( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )； $\Delta m$ 为水损失的质量( $\text{kg}$ )； $s$ 为太阳光照射面积( $\text{m}^2$ )； $t$ 为光照时间( $\text{h}$ )。

通过下式计算蒸发器的光热转换效率 $\eta$ <sup>[16]</sup>：

$$\eta = \frac{(m_{\text{light}} - m_{\text{dark}})h_{\text{equ}}}{C_{\text{opt}}P_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中， $m_{\text{light}}$ 和 $m_{\text{dark}}$ 分别为蒸发器在1个太阳光照照射和黑暗条件下的蒸发速率( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )； $C_{\text{opt}}$ 为蒸发器表面的光密度； $P_0$ 为光照强度( $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ )； $h_{\text{equ}}$ 为蒸发器内部水的等效蒸发焓( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ )，由下式计算：

$$U_{\text{in}} = h_{\text{equ}}m_{\text{g}} = h_0m_0 \quad (3)$$

式中， $U_{\text{in}}$ 为系统输入的总能量( $\text{J}$ )； $h_0$ 和 $h_{\text{equ}}$ 分别为纯水和蒸发器内部水的蒸发焓( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ )； $m_0$ 和 $m_{\text{g}}$ 分别为纯水和蒸发器内部水在黑暗时的质量变化( $\text{g}$ )。

### 1.5.7 海水淡化和污水净化能力测试

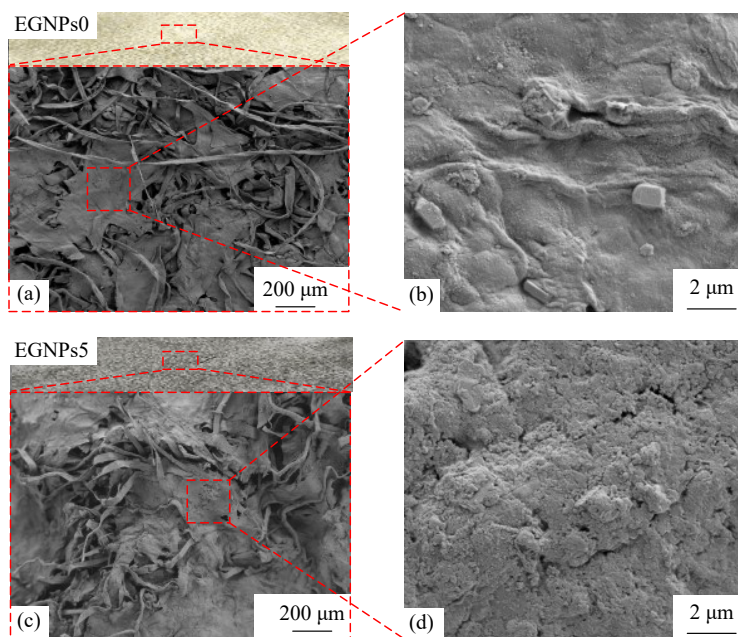
采用电感耦合等离子体发射光谱仪测试海水淡化前后离子的浓度变化，采用UV-Vis-NIR来测试纯化前后污染物的光谱吸收强度。

## 2 结果与讨论

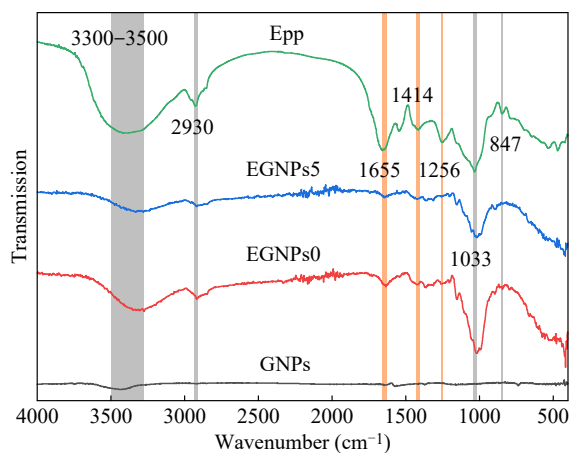
### 2.1 结构表征与亲水性研究

对EGNPs0和EGNPs5进行了表征，图2(a)和2(c)上部分别为其光学图像，EGNPs5因GNPs的引入显示出具有比EGNPs0更深的颜色，光热材料的引入为蒸发器高的光吸收提供了可能。图2(a)和2(c)下部的SEM结果显示，蒸发器的主体由长短不一的纤维材料交错纵横的堆叠而成，表明EC和PP成功的混合在了一起。EGNPs0的表面相对光滑，EGNPs5的表面相对粗糙，这是因为GNPs的成功引入使其穿插在了各纤维的网络之间，图2(b)和2(d)的SEM局部放大图也证实了这一结果。以上结果表明，含有EC、PP和GNPs的纸张被成功的制备出来。

FTIR测试结果表明(图3)，吸收峰 $2930 \text{ cm}^{-1}$ 源自 $\text{CH}_2$ 的不对称拉伸振动， $1033$ 和 $847 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰展示了脱水葡萄糖环的 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 的拉伸振动，以及葡萄糖单元之间 $\beta$ -D糖苷键的特征



**Fig. 2** (a) Photograph (upper) and SEM image (down) of EGNPs0; (b) Local magnified SEM images of EGNPs0; (c) Photograph (upper) and SEM images (down) of EGNPs5; (d) Local magnified SEM images of EGNPs5.

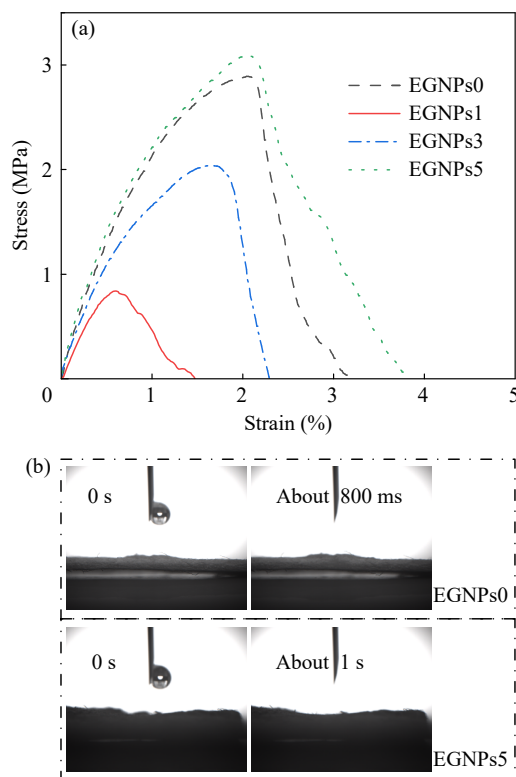


**Fig. 3** FTIR spectra of Epp, GNPs, EGNPs0 and EGNPs5.

性吸收. 经过碱处理和漂白处理后, Epp成功去除了木质素和半纤维素的3个重要的特征峰, 分别位于1656、1414和1256  $\text{cm}^{-1}$ . 位于1656  $\text{cm}^{-1}$ 的特征峰表示半纤维素的乙酰基和乙醛酸基的振动或木质素的羧基键的振动, 1414和1256  $\text{cm}^{-1}$ 的特征峰源自木质素C=C的主链振动以及木质素或半纤维素C-O的拉伸<sup>[17]</sup>. 经过酸碱处理后, 这3个峰值明显减弱, 说明了木质素和半纤维素被有效去除. 3300~3500  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰归因于羟基基团氢键的拉伸振动, 随着GNPs的引入, 峰值逐渐降低, 这可能是EC上的部分羟基与EGNPs表面的 $\pi$ 电子云形成了新的氢键<sup>[18]</sup>. 纤维素自身原有的氢键网络被破坏, 可用于红外吸收的自由

羟基的数量相对减少了.

对EGNPs0、EGNPs1、EGNPs3和EGNPs5样品进行了拉伸试验, 如图4(a)所示. 其最大应力分别为2.89、0.84、2.04和3.09 MPa, 随着GNPs



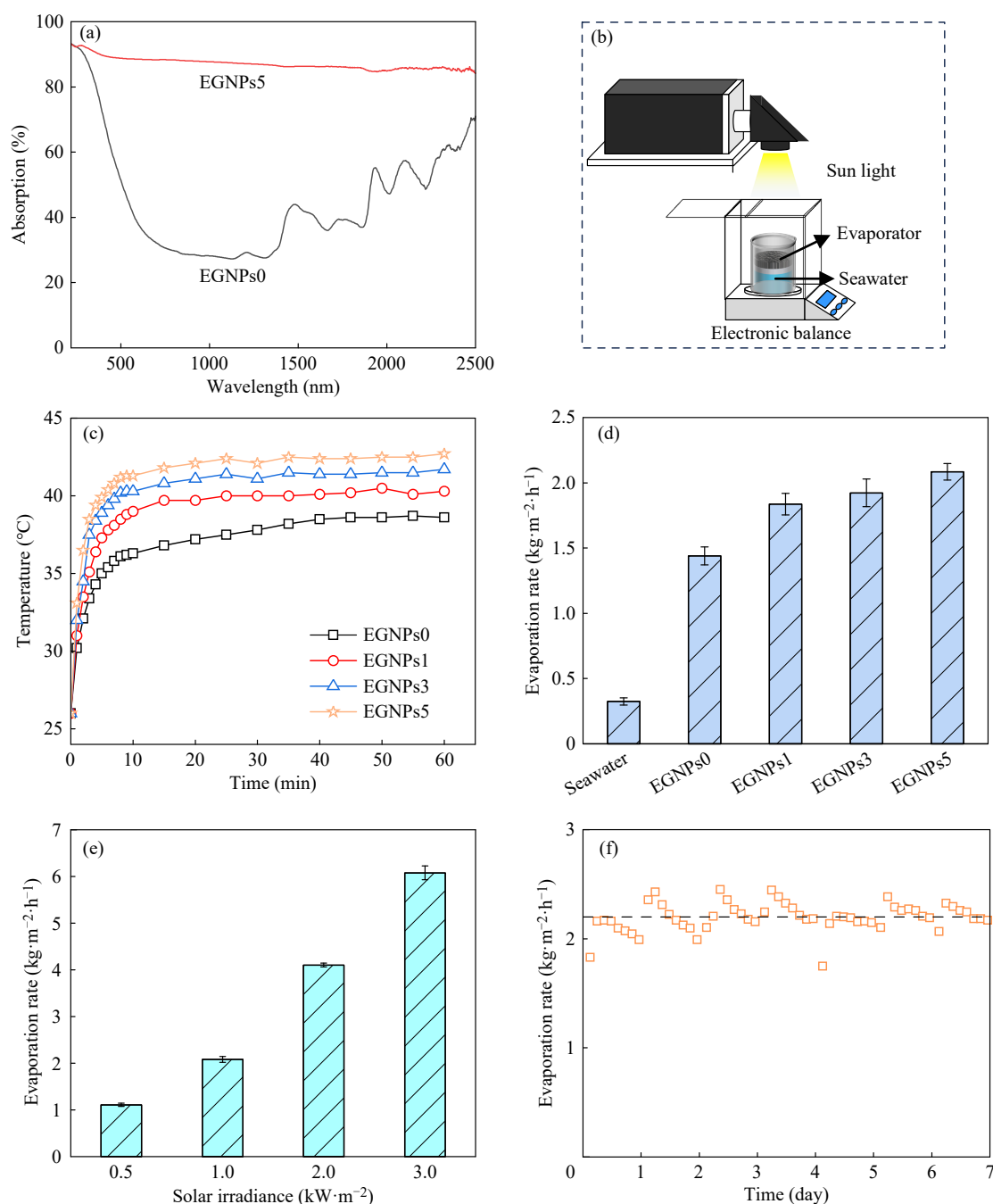
**Fig. 4** (a) Tensile stress-strain curves of different EGNPs; (b) Hydrophilicity testing of EGNPs0 and EGNPs5.

的加入其应力呈现先降低后上升的趋势，这一结果表明EC与GNPs间产生了力的作用，可能与氢键网络的形成有关。采用光学接触角测量仪分别对EGNPs0和EGNPs5的亲水性进行了研究，结果如图4(b)所示。EGNPs0在800 ms左右将水滴全部吸收，EGNPs5在1 s左右将水滴吸收，这一结果表明，GNPs的引入虽然导致了亲水性官能团羟

基峰值的降低，但对其亲水性几乎没有影响。

## 2.2 蒸发器的太阳能光热和海水蒸发性能

蒸发器在ISDT中的光热转化能力是高效太阳能水蒸发的关键，为了评估其太阳光吸收能力，在220~2500 nm光谱范围内，对EGNPs0和EGNPs5的表面进行了UV-Vis-NIR光谱测试。如图5(a)所示，EGNPs0在光谱范围内的吸收率仅



**Fig. 5** (a) UV-Vis-NIR spectra of EGNPs0 and EGNPs5; (b) Schematic diagram of using electronic balance to record mass loss of desalinated seawater; (c) The surface temperatures of different EGNPs evaporator under 1.0 kW·m<sup>-2</sup>; (d) The evaporation rate of seawater and different EGNPs evaporator under light condition of 1.0 kW·m<sup>-2</sup>; (e) The evaporation rate of EGNPs5 under different solar irradiance; (f) Cyclic stability test of EGNPs5 working 8 hours a day for a week under 1.0 kW·m<sup>-2</sup>.

为45.66%，GNPs因其自身特性具有较高的光吸收率，当负载GNPs后EGNPs5的平均吸收率达到了87.19%，这一结果表明EGNPs5具有应用于ISDT的潜力。为了评估各蒸发器的性能，在1.0个太阳光强度( $1.0 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ )下，通过图5(b)中所搭建的设备实时测量并记录了海水1 h内的质量变化，并通过热电偶实时检测并记录了蒸发器表面温度变化。通过图5(c)可以看到蒸发器的表面温度在10 min内迅速上升，并且基本达到平稳状态。EGNPs5从初始 $26^\circ\text{C}$ 上升到 $41.3^\circ\text{C}$ ，EGNPs0、EGNPs1和EGNPs3分别从 $26.1^\circ\text{C}$ 左右上升到 $36.3^\circ\text{C}$ 、 $39.0^\circ\text{C}$ 和 $40.3^\circ\text{C}$ 。这一结果表明EGNPs蒸发器具有快速的温度响应特性，能够高效的将太阳能转换为热量用于水蒸发。

通过图5(d)可以看到，与海水、EGNPs0、EGNPs1和EGNPs3相比较，EGNPs5所在组具有最多的水质量损失，采用公式(1)计算得到其蒸发速率可以达到 $2.08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，分别为海水( $0.32 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )、EGNPs0 ( $1.43 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )、EGNPs1 ( $1.83 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )和EGNPs3 ( $1.92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )的6.50、1.45、1.13倍。随着GNPs含量的增加，其蒸发速率也随之增长，这与图5(c)显示的温度上升曲线相对应。表明具有高光热转换能力的蒸发器具有更多的能量来蒸发散装水，从而会使其蒸发速率增加。光热转换效率( $\eta$ )是评价蒸发器性能的另一个重要参数。在黑暗条件测得纯水和EGNPs5在1 h内的质量变化为0.168和0.343 g，利用公式(3)来计算蒸发器的等效蒸发焓。在一个大气压环境下，纯水在 $25^\circ\text{C}$ 时的理论蒸发焓为 $2442.00 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ，由此得出EGNPs5的蒸发焓为 $1196.08 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。这一结果表明蒸发EGNPs5内部水所需要的能量远远小于同等质量的散装水。根据公式(2)和(3)计算得到其 $\eta$ 为57.90%，显示出其较好的光热转换能力。

蒸发器在工作过程中外界环境可能也会对其造成影响。因此，进一步研究了光照强度的改变对蒸发器的影响，如图5(e)所示。当EGNPs5处在0.5个太阳光照强度( $0.5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ )下时其平均蒸发速率可以达到 $1.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，随着光照强度增加到 $3.0 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，其平均蒸发速率增长至 $6.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，表明其具有在不同光照强度条件下工作的能力。为实现持续淡化海水的目的，蒸发器需具备长期稳定运行的能力。因此，采用

EGNPs5在实际海水中进行了为期一周的海水淡化实验，如图5(f)所示。实验结果显示其蒸发速率在整个过程中基本维持稳定，计算得到 $2.20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的平均蒸发速率。

### 2.3 蒸发器的耐盐性和可回收性

选取EGNPs5为蒸发器以海水和不同浓度的NaCl溶液(5 wt%、10 wt%和20 wt%)用于蒸发实验，以此来研究其抗盐能力。如图6所示，随着NaCl溶液浓度的增加蒸发系统的质量损失逐渐降低，当NaCl溶液浓度上升到10 wt%时，蒸发速率从海水的 $2.08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 降低到 $1.82 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，当其在20 wt% NaCl溶液中工作时，蒸发速率下降到 $1.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。这可能是在海水蒸发过程中，水分子需要摆脱与离子的相互作用。当在较高浓度的NaCl溶液中，水分子与离子之间的相互作用增加，使得蒸发能垒更高。在20 wt% NaCl溶液中，EGNPs5仍然能达到 $1.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率，说明其在高浓度盐水蒸发中也有较好的应用前景。

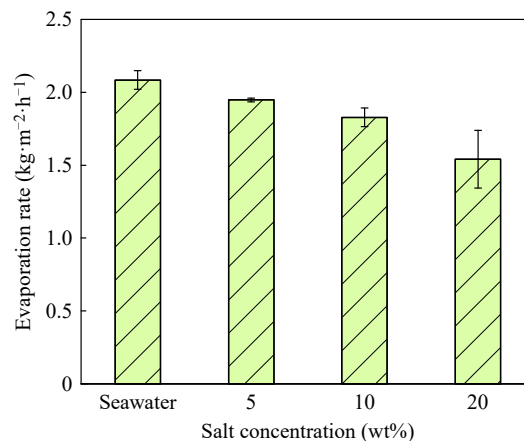
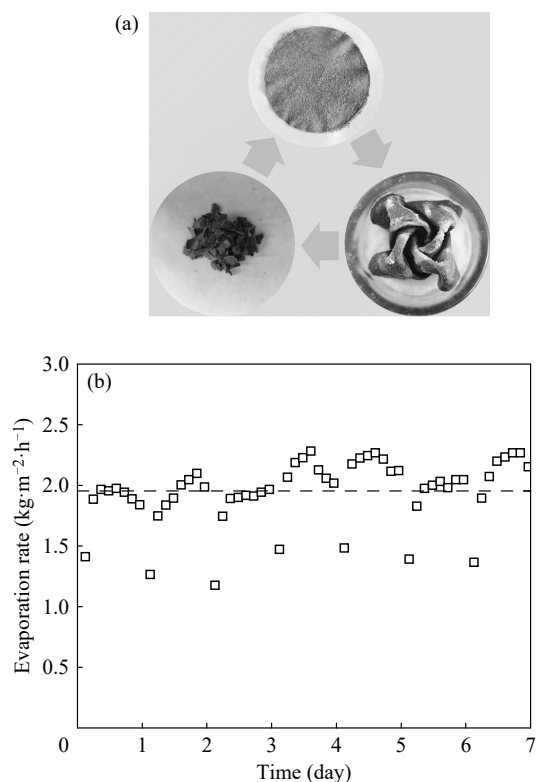


Fig. 6 The evaporation rate of EGNPs5 evaporation at seawater and different salt concentrations under  $1.0 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

盐沉积是高效太阳能海水淡化过程中的一个难题。EGNPs5在20 wt% NaCl溶液中工作3 h后，其表面不可避免地出现了盐晶体的析出现象，如图7(a)所示。无法正常工作的蒸发器的可回收性或可降解性是一个不可忽视的问题，应当避免造成对环境的二次污染。该蒸发器的形成是基于纤维素之间强大的氢键网络的紧密结合，通过将其剪碎、浸泡和搅拌后可以重新制备回到纸张的形态，然后通过折叠的方式制备为蒸发器可以重新投入使用。对回收后的蒸发器(r-EGNPs5)进行了



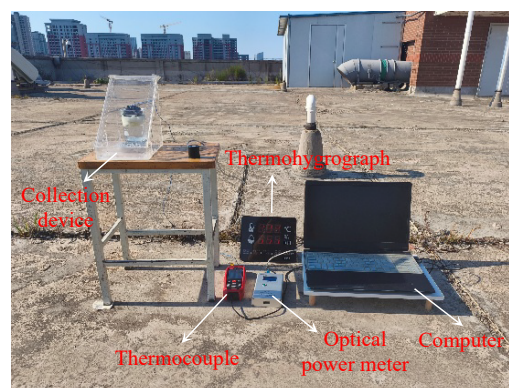
**Fig. 7** (a) Salting out and recovery flowchart of EGNPs5; (b) Cyclic stability test of r-EGNPs5 working 8 h a day for a week under  $1.0 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

为期1周的蒸发测试，图7(b)显示其蒸发速率基本没有变化，平均速率维持在  $1.95 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . 这一结果表明，经回收后的蒸发器可以重新投入使用.

#### 2.4 蒸发器的海水淡化性能

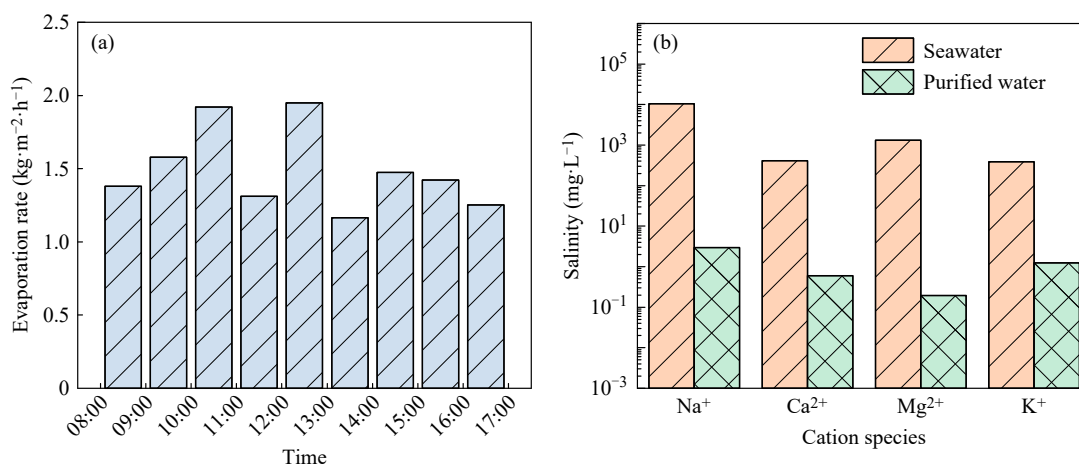
为了研究 EGNPs5 蒸发器在实际太阳光照射下的海水淡化性能. 我们搭建了一个海水淡化收集装置用于户外实验，采用温度和湿度测量仪实时记录环境的温度和湿度，光密度计测量太阳光照强度，热电偶和电脑实时测量和记录蒸发器的

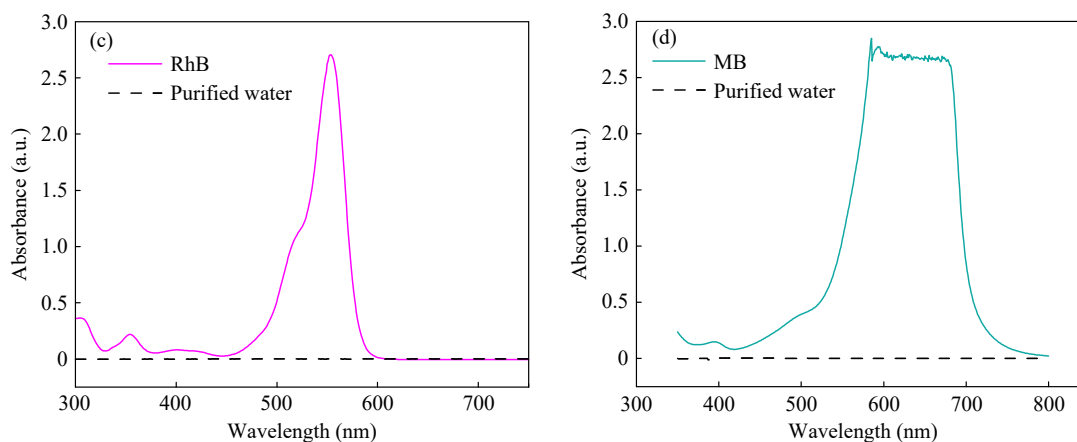
表面温度，以及用由透明冷凝板和收集仓组成的收集装置来收集淡水，如图8所示. 其具体工作原理为，海水被装在一个烧杯内，蒸发器被聚氨酯泡沫负载漂浮在海水上，吸水棉吸收海水为蒸发器持续供水，自然光可以穿透透明容器照射在样品表面，使海水蒸发，烧杯被放在天平上用来实时记录海水的质量损失.



**Fig. 8** Photograph of the outdoor evaporation experiment device.

于2025年7月26日以青岛市黄海水样为研究对象进行了9 h的户外实验，测试时间为8:00~17:00，具体结果如图9所示. 图9(a)显示了蒸发器在这一天中的蒸发速率，可以看到其蒸发速率最高可以达到  $1.94 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，与室内  $1.0 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  下的蒸发测试几乎具有一样的性能，表明其具有在户外工作的能力. 为了评估蒸发器的净化能力，测定了海水和净化后水中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  4种典型离子的浓度. 如图9(b)所示，在淡化处理之后，离子的浓度均降低了3~4个数量级，去除率高于99%，远低于WHO和美国环境保护局(EPA)规定的可饮用水离子浓度标准<sup>[9]</sup>.





**Fig. 9** (a) The evaporation rate of seawater in the evaporation experiment device over time in one day; (b) Concentrations of ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) in seawater and collected evaporation water; UV-Vis-NIR absorption spectra of RhB (c) and MB (d) before and after EGNPs5 evaporation treatment.

基于 ISDT 的太阳能脱盐原理, 蒸发器有被应用于污水处理的可能, 以不同染料废水模拟工业废水, 进一步研究了 EGNPs5 蒸发器在污水处理中的应用前景. 配制了  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的亚甲基蓝 (MB) 和罗丹明 (RhB) 溶液, 对其进行净化处理. 通过图 9(c) 和 9(d) 可以看到, 有机染料的特征吸收峰基本完全消失, 表明 EGNPs5 对染料的去除也有较好的能力.

### 3 结论

从浒苔中提取了浒苔纤维素, 并结合造纸术和折纸工艺成功制备了一种环境友好、可回收利用

用的纸基折纸蒸发器. 该工作不仅为解决浒苔污染问题提供了一种资源化利用的有效途径, 并为长期工作后蒸发器的后处理提供了一种解决方法. 在  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  的光照条件下, 蒸发器 EGNPs5 的平均蒸发速率可以达到  $2.08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . 其在为期一周的海水淡化实验中的性能基本维持稳定, 平均蒸发速率为  $2.20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . 将长期工作后的蒸发器进行回收重新制备后, 其性能也维持在  $1.95 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  左右, 基本没有受到影响. 并且户外蒸发实验证明蒸发器具有较好的水蒸发净化能力, 其能够很好的去除  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子, 且去除率高于 99%.

### REFERENCES

- 1 Wang, C. J.; Liu, X. L.; Yang, T. H.; Sridhar, D.; Algadi, H.; Xu, B. B.; El-Bahy, Z. M.; Li, H. D.; Ma, Y.; Li, T. X.; Guo, Z. H. An overview of metal-organic frameworks and their magnetic composites for the removal of pollutants. *Sep. Purif. Technol.*, **2023**, 320, 124144.
- 2 Nazari, B.; Keshavarz, M. Water population density: Global and regional analysis. *Theor. Appl. Climatol.*, **2023**, 153(1), 431–445.
- 3 Wu, X.; Lu, Y.; Ren, X. H.; Wu, P.; Chu, D. W.; Yang, X. F.; Xu, H. L. Interfacial solar evaporation: from fundamental research to applications. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(23), 2313090.
- 4 Ko, Y.; Lee, S.; Jang, J.; Kwon, G.; Lee, K.; Jeon, Y.; Lee, A.; Park, T.; Kim, J.; You, J. Nanocellulose-based interfacial solar evaporator: Integrating sustainable materials and micro-/ nano-architectures for solar desalination. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(5), 2414576.
- 5 Alawad, S. M.; Khalifa, A. E. Development of an efficient compact multistage membrane distillation module for water desalination. *Case Stud. Therm. Eng.*, **2021**, 25, 100979.
- 6 Bórque, R.; Ferrer, J. Seawater desalination by combined nanofiltration and ionic exchange. *Desalin. Water Treat.*, **2016**, 57(58), 28122–28132.
- 7 Qasim, M.; Badrelzaman, M.; Darwish, N. N.; Darwish, N. A.; Hilal, N. Reverse osmosis desalination: a state-of-the-art review. *Desalination*, **2019**, 459, 59–104.

- 8 Huang, C.; Wang, Z. Y.; Zhao, X. Y.; Bao, X. Y.; Guo, C. J.; Hou, W. B.; Song, H. Hydrogel-based solar-driven interfacial evaporation and seawater desalination. *Adv. Mater. Technol.*, **2025**, 10(24), e01477.
- 9 Cui, Y. Q.; Liang, X. X.; Wang, Y.; Wang, J. Y.; Lohwacharin, J.; Lichtfouse, E.; Wang, C. Y. Advances in hydrogel-based photothermal interfacial solar steam generation: Classifications, mechanisms, and applications. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, doi:10.1002/adfm.2509130.
- 10 Xu, B.; Zhao, X. G.; Zuo, X. C.; Yang, H. M. Progress of phase change materials in solar water desalination system: A review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2024**, 271, 112874.
- 11 Zhang, B.; Gong, X. Hybrid hydrogel evaporators integrated with the BiOI/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> heterojunctions for enhanced solar desalination and photocatalytic reduction. *Small*, **2025**, 21(42), e03889.
- 12 Han, H. B.; Wen, R. B.; Wang, H.; Zhao, S. Comparison of growth and nutrient uptake capacities of three dominant species of Qinhuangdao green tides. *Acta Oceanol. Sin.*, **2023**, 42(4), 114–123.
- 13 Ray, U.; Zhu, S. Z.; Pang, Z. Q.; Li, T. Mechanics design in cellulose-enabled high-performance functional materials. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(28), 2002504.
- 14 张书玉, 郭建荣, 贺军辉, 任世学. 秸秆基高强度透明纤维素薄膜. *高分子学报*, **2024**, 55(8), 1009–1020.
- 15 Hou, L. H.; Xing, Z. Z.; Luo, S. J.; Li, T. L.; Wang, H. T. Self-regulating hydrogel spheres for salt-resistant solar desalination. *Desalination*, **2025**, 615, 119255.
- 16 Chu, A. Q.; Yang, M.; Chen, J. L.; Zhao, J. M.; Fang, J.; Yang, Z. S.; Li, H. Biomass-enhanced Janus sponge-like hydrogel with salt resistance and high strength for efficient solar desalination. *Green Energy Environ.*, **2024**, 9(11), 1698–1710.
- 17 Li, D.; Zhang, X. X.; Dong, K. N.; Liu, Z. T.; Xiong, K.; Ren, L. H. Preparation and characterization of reusable sodium alginate/enteromorpha cellulose micro-nanofibers composite aerogels for efficient oil absorption. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, **2025**, 719, 137015.
- 18 Tran, T. T.; Vu, T. C.; Van Hoang, H.; Huang, W. F.; Pham, H. T.; Nguyen, H. M. T. How are hydroxyl groups localized on a graphene sheet? *ACS Omega*, **2022**, 7(42), 37221–37228.
- 19 Guo, Z. H.; Chen, L.; Liu, Q.; Lang, J. Q.; Yang, S. C.; Mai, T.; Ma, M. G. 3D-printed dual-scale porous hydrogel evaporator with biomimetic architecture for high-efficiency solar desalination and sustainable salt rejection. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 522, 167800.

## Research Article

## Preparation of *Enteromorpha prolifera* Cellulose-based Foldable Evaporator and Its Desalination Performance

Ji-jin Wu<sup>1</sup>, Zheng-ting Song<sup>1</sup>, Wen-tao Hu<sup>1</sup>, Chang-ping Feng<sup>1,2\*</sup>, Jie Yang<sup>2</sup>, Wei Yang<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup>Shandong Engineering Research Center for Manufacturing, School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520)

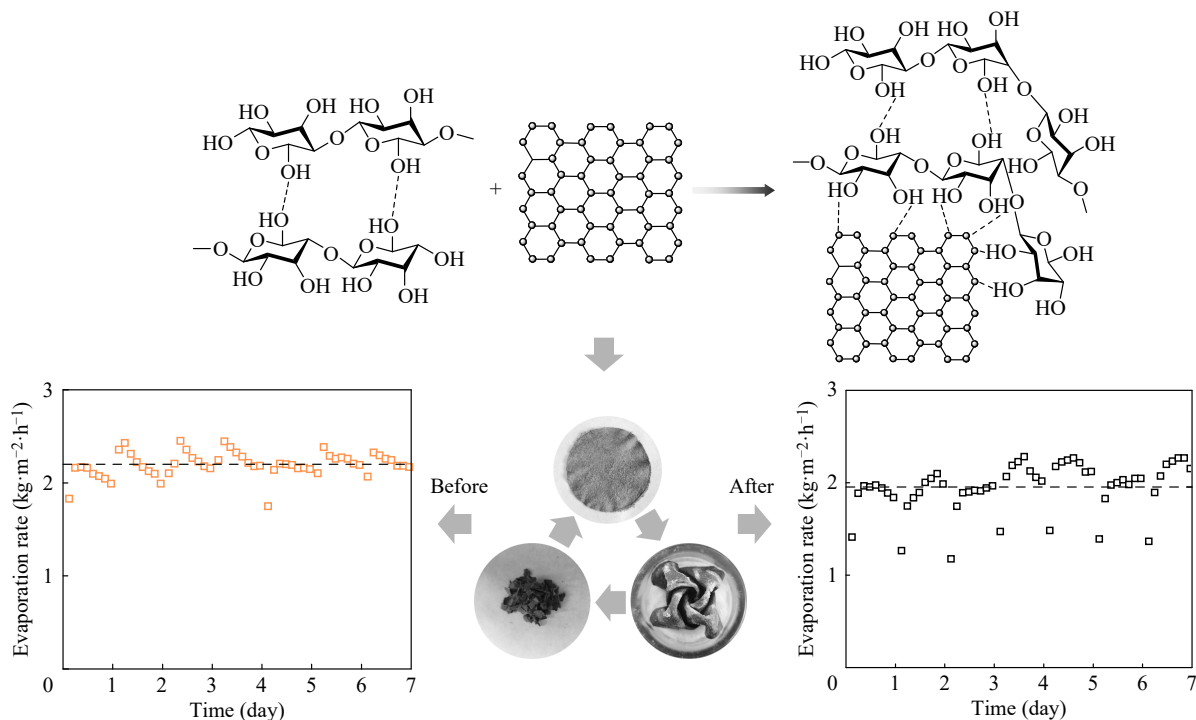
(<sup>2</sup>State Key Laboratory of Advanced Polymer Materials, College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

**Abstract** Solar-driven desalination holds significant potential for addressing global freshwater shortages. However, evaporators after prolonged operation commonly face challenges related to difficulty in recycling and degradation, which severely impacts the sustainable application of this technology. Inspired by paper recyclability and the traditional Chinese origami techniques, a recyclable origami-style evaporator was prepared using *Enteromorpha prolifera* cellulose as the main material mixed with pulp fibers, and graphene nanoplatelets were introduced to enhance its photothermal conversion performance. Under 1.0 kW·m<sup>-2</sup> illumination, the evaporator achieved an average evaporation rate of 2.20 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>. Outdoor experimental results demonstrated its effective removal

\* Corresponding authors: Chang-ping Feng, E-mail: fengchangping@qut.edu.cn

Wei Yang, E-mail: weiyang@scu.edu.cn

capability for typical ions in seawater, including  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ , and  $Mg^{2+}$ , with a removal rate exceeding 99%. After recycling and re-preparation, the regenerated evaporator maintained an evaporation rate of  $1.95 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . This work not only provides novel structural inspiration for efficient desalination but also offers a sustainable solution to evaporator recyclability and the environmental issue of *Enteromorpha prolifera* blooms along the Chinese coastline.



**Keywords** *Enteromorpha prolifera*; Cellulose; Desalination; Photothermal conversion; Recyclability