

分类号: TB34

单位代码: 10363

密 级: 公 开

学 号: 2220410106

题 目 茄子基多孔材料的构建及其清洁水生产性能研究

英文并列

题 目 RESEARCH ON CONSTRUCTION AND CLEAN
WATER PRODUCTION PERFORMANCE OF
EGGPLANT BASED POROUS MATERIAL

学生姓名: 李乐乐

指导教师: 刘志（副教授）/杨青（工程师）

专 业: 材料与化工

研究方向: 生态染整与功能纺织品

论文答辩日期: 2025 年 5 月 16 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：李乐乐

日期：2025年 5 月 23 日

安徽工程大学学位论文版权使用说明书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：李乐乐

指导教师签名：孙

日期：2025年 5 月 23 日

日期：2025年 5 月 23 日

茄子基多孔材料的构建及其清洁水生产性能研究

摘 要

随着全球人口不断增长、经济持续发展和工业污染日益加剧，淡水资源短缺严重影响了人类社会的发展。太阳能界面水蒸发技术因其绿色无污染、能量转换效率高，在海水淡化和染料废水处理、重金属离子废水处理等领域具有广阔的前景。光热水蒸发过程中，通过光热转换材料把太阳光转换为热量实现水蒸发，得到可以饮用的清洁水。作为光热转换的主要材料之一，生物质材料具备来源广、可降解、易于修饰改性等优点，是一种理想的光热转换基体材料。本文以生物质茄子为基体材料，分别通过碳化工艺和原位聚合吡咯构建了两种不同的茄子基太阳能界面蒸发器，分析并讨论了它们的物理化学性能和光热清洁水生产性能。主要研究内容有以下几个部分：

1. 茄子基气凝胶的构建及性能表征。（1）首先，通过碱处理、冷冻干燥、碳化工艺制备了茄子碳（Eggplant carbon, EC）气凝胶。其次，对 EC 气凝胶微观形貌、结构特征、吸光性能、快速导水和快速回流性能等性能进行表征。最后，对 EC 气凝胶进行光热清洁水生产性能进行系统表征。（2）EC 气凝胶制备过程高能耗、机械性能差、且不能去除蒸发介质中的有害物质等缺点。为此，通过碱处理、冷冻干燥、原位合成聚吡咯工艺，制备了聚吡咯改性天然茄子（Polypyrrole-modified natural eggplant, PPy@eggplant）复合气凝胶。该气凝胶力学性能好、形状回复性高，可同时高效生产清洁水和吸附废水中的重金属离子。随后，对 PPy@eggplant 气凝胶微观形貌、结构特征、吸光性能、力学性能等性能进行了表征。此外，系统研究了 PPy@eggplant 气凝胶在水介质中经过挤压和扭转后的快速回复能力。最后，研究了 PPy@eggplant 气凝胶光热水蒸发和协同重金属离子吸附性能。

2. 茄子碳（EC）气凝胶的光热水蒸发性能。对 EC 气凝胶的不同浓度盐水蒸发性能、不同浓度盐水循环蒸发性能、户外盐水蒸发性能进行系统的表征分析。结果表明：（1）EC 气凝胶的蒸发性能与碳化温度、材料厚度有关，当碳化温度为 650 °C、厚度为 5 mm 时，EC 气凝胶的水蒸发速率达到最高（ $2.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ）。（2）所制备的 EC 气凝胶具有高孔隙率（97.80%）、

优异的太阳光吸收率（97.26%），其对不同浓度的 NaCl 溶液（0、3.5、10、15 和 25 wt.%）的蒸发速率分别为 2.12、2.09、1.84、1.75、1.68 和 1.60 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。（3）EC 气凝胶分别对 3.5、15、25 wt.% NaCl 溶液连续蒸发 10 h 后，蒸发速率无明显变化，表明其具备良好的抗盐性和蒸发稳定性。

（4）EC 气凝胶进行了 10 h 的户外盐水（20 wt.%）蒸发测试（产水能力为 12.07 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ），表明 EC 气凝胶具有出色的清洁水生产实际应用前景。

3. 茄子/聚吡咯（PPy@eggplant）复合气凝胶的光热水蒸发性能。对 PPy@eggplant 气凝胶的多种染料废水、重金属离子废水、以及含有 Cr^{6+} 重金属离子的染料废水进行同时水蒸发和静态/动态吸附重金属离子性能的表征。结果表明：（1）原位聚合制备的 PPy@eggplant 气凝胶的压缩应力达到 43.85 kPa，是茄子气凝胶（24.38 kPa）的 1.8 倍。在水中经过挤压和扭转后，PPy@eggplant 气凝胶都可以在 50 s 内回复形状，表明其在水中具有优异的尺寸稳定性和形状回复能力。（2）PPy@eggplant 气凝胶的蒸发性能与吡咯含量、材料厚度有关，当吡咯含量为 0.1 g、厚度为 0.5 cm 时，PPy@eggplant 气凝胶的水蒸发速率达到最高（2.05 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ）。（3）所制备的 PPy@eggplant 气凝胶具有高孔隙率（92.16%）、优异的太阳光吸收率（98.48%），其对纯水蒸发速率达到 2.05 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，对 MB、MO、RhB 染料废水蒸发速率分别达到 1.98、1.94 和 1.92 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。（4）PPy@eggplant 气凝胶对 50 mg/L 的重金属离子（ Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} ）光热水蒸发吸附 1 h 后，其对 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附容量分别为 10.16、9.81 和 8.41 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

（5）与静态吸附相比，PPy@eggplant 气凝胶的动态蒸发速率变化不大，而 Cr^{6+} 动态条件吸附量从 9.82 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 显著提高到 14.66 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。（6）连续蒸发和吸附 4 h 后，PPy@eggplant 气凝胶在保留蒸发速率的同时， Cr^{6+} 离子吸附量分别增加到 18.2 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ （静态测试）和 27.83 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ （动态测试），表明了 PPy@eggplant 气凝胶具备较好的蒸发稳定性、吸附性能和潜在的实际应用前景。

关键词：太阳能，生物质，茄子，光热转换，清洁水生产

RESEARCH ON CONSTRUCTION AND CLEAN WATER PRODUCTION PERFORMANCE OF EGGPLANT BASED POROUS MATERIAL

ABSTRACT

With the growing global population, continuous economic development and increasing industrial pollution, the shortage of freshwater resources has seriously affected the development of human society. Solar interface water evaporation technology has a broad prospect in the field of seawater desalination and dye wastewater treatment, heavy metal ion wastewater treatment and so on because of its green non-pollution and high energy conversion efficiency. In the process of evaporation of optical hot water, water evaporation is realized by converting sunlight into heat through photothermal conversion materials, and clean water that can be drunk is obtained. As one of the main materials for photothermal conversion, biomass material has the advantages of wide source, degradability, easy modification and modification, which is an ideal matrix material for photothermal conversion. In this paper, two different eggplant-based solar interfacial evaporators were constructed using biomass eggplant as the matrix material by carbonization process and in-situ polymerization pyrrole, respectively, and their physicochemical properties and photothermal clean water production performance were analyzed and discussed. The main research is summarized in the following sections:

1. Construction and performance characterization of eggplant-based aerogel. (1) Firstly, Eggplant carbon (EC) aerogels were prepared by alkali treatment, freeze-drying and carbonization processes. Secondly, the properties of EC aerogel such as microscopic morphology, structural features, light-absorbing properties, fast water-conducting and fast reflux properties were characterized. Finally, the EC aerogel was systematically characterized for photothermal clean water production. (2) The EC aerogel preparation process has the disadvantages of high energy consumption, poor mechanical properties, and the inability to remove harmful substances in the evaporation medium. For this reason,

polypyrrole-modified natural eggplant (PPy@eggplant) composite aerogel was prepared by alkali treatment, freeze-drying, and in situ synthesis of polypyrrole process. The aerogel had good mechanical properties and high shape reversibility, and could simultaneously produce clean water and adsorb heavy metal ions from wastewater with high efficiency. Subsequently, the properties of PPy@eggplant aerogel such as microscopic morphology, structural features, light-absorbing properties, and mechanical properties were characterized. In addition, the fast recovery ability of PPy@eggplant aerogel after extrusion and torsion in aqueous medium was systematically investigated. Finally, the photothermal water evaporation and synergistic heavy metal ion adsorption properties of PPy@eggplant aerogel were investigated.

2. Photohydraulic evaporation performance of eggplant carbon (EC) aerogels. The evaporation performance of EC aerogel with different concentrations of brine, the evaporation performance of different concentrations of brine cycle, and the evaporation performance of outdoor brine are systematically characterized and analyzed. The results show that: (1) the evaporation performance of EC aerogel is related to the carbonization temperature and material thickness, and the water evaporation rate of EC aerogel reaches the highest ($2.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) when the carbonization temperature is 650°C and the thickness is 5 mm. (2) The prepared EC aerogels had high porosity (97.80%), excellent solar light absorption (97.26%), and their evaporation rates for different concentrations of NaCl solutions (0, 3.5, 10, 15, and 25 wt.%) were 2.12, 2.09, 1.84, 1.75, 1.68, and $1.60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. (3) The evaporation rates of EC aerogels did not change significantly after 10 h of continuous evaporation of 3.5, 15, and 25 wt.% NaCl solutions, respectively, indicating that they possess good salt resistance and evaporation stability. (4) The EC aerogel was tested for 10 h of outdoor brine (20 wt.%) evaporation (water production capacity of $12.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$), indicating that the EC aerogel has excellent prospects for practical application in clean water production.

3. Photohydraulic evaporation performance of eggplant/polypyrrole (PPy@eggplant) composite aerogels. Simultaneous water evaporation and static/dynamic adsorption of heavy metal ions performance of PPy@eggplant aerogel for a variety of dye wastewaters, heavy metal ion wastewaters, and dye wastewaters containing Cr^{6+} heavy metal ions were characterized. The results showed that: (1) The compressive stress of the PPy@eggplant aerogel prepared by in-situ polymerization reaches 43.85 kPa, which is 1.8 times that of the

eggplant aerogel (24.38 kPa). The PPy@eggplant aerogel can recover its shape within 50 s after both extrusion and torsion in water, indicating its excellent dimensional stability and shape recovery in water. (2) The evaporation performance of PPy@eggplant aerogel is related to the pyrrole content and the thickness of the material, and the water evaporation rate of PPy@eggplant aerogel reaches the highest ($2.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) when the pyrrole content is 0.1 g and the thickness is 0.5 cm. (3) The prepared PPy@eggplant aerogel has high porosity (92.16%), excellent solar light absorption (98.48%), and its evaporation rate reaches $2.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ for pure water, and 1.98, 1.94, and $1.92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ for MB, MO, and RhB dye wastewater, respectively. (4) After 1 h of photo-thermal water evaporation and adsorption of 50 mg/L of heavy metal ions (Cr^{6+} , Cu^{2+} , and Ni^{2+}) by PPy@eggplant aerogel, its adsorption capacity of Cr^{6+} , Cu^{2+} , and Ni^{2+} were 10.16, 9.81, and $8.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. (5) Compared with static adsorption, the dynamic evaporation rate of PPy@eggplant aerogel did not change much, whereas the dynamic conditional adsorption capacity of Cr^{6+} increased significantly from $9.82 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ to $14.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. (6) After 4 h of continuous evaporation and adsorption, the Cr^{6+} ion adsorption of PPy@eggplant aerogel increased to $18.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (static test) and $27.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (dynamic test), respectively, while retaining the evaporation rate. The PPy@eggplant aerogels were shown to possess better evaporation stability, adsorption properties and potential practical applications.

Li Lele (Materials and Chemical Engineering)

Supervised by Liu Zhi

KEY WORDS: solar energy, biomass, eggplant, photothermal conversion, clean water production

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	VI
第 1 章 绪 论	1
1.1 概述	1
1.2 太阳能光热转换材料分类	2
1.2.1 等离子体金属材料	2
1.2.2 有机聚合物材料	2
1.2.3 半导体材料	3
1.2.4 碳基材料	4
1.3 生物质材料在光热转换应用中的研究现状	4
1.4 生物质茄子材料在光热转换中的研究现状	7
1.5 本论文的主要内容与创新点	8
1.5.1 本论文的主要内容	8
1.5.2 本论文的主要创新点	8
第 2 章 茄子基多孔材料的构建及测试方法	10
2.1 引言	10
2.2 茄子碳气凝胶的构建及其测试方法	10
2.2.1 实验材料和药品	10
2.2.2 EC 气凝胶的制备	10
2.2.3 材料测试与表征方法	11
2.2.4 等效蒸发焓的估算	14
2.2.5 芯吸速率方程的推导	14
2.2.6 数值模拟	15
2.3 茄子/聚吡咯复合气凝胶的构建及其测试方法	16
2.3.1 实验材料和药品	16
2.3.2 PPy@eggplant 气凝胶的制备	17
2.3.3 材料测试与表征方法	17
2.3.4 水蒸发过程中辐射、对流和传导的能量损失评估	19

2.3.5 光、暗条件下溶液吸光度的评估	19
2.4 本章小结	19
第 3 章 高抗盐茄子碳气凝胶光热水蒸发性能研究	21
3.1 引言	21
3.2 结果与分析	22
3.2.1 形貌、润湿性分析	22
3.2.2 结构特征和元素分析	24
3.2.3 材料力学性能分析	25
3.2.4 吸光度, 导热系数分析	26
3.3 EC 气凝胶光热转换性能	27
3.3.1 碳化温度对光热水蒸发性能的影响	27
3.3.2 材料厚度对光热水蒸发性能的影响	28
3.3.3 盐浓度对光热水蒸发性能的影响	29
3.3.4 EC 气凝胶快速水传输性能研究	31
3.3.5 EC 气凝胶快速回流性能研究	33
3.3.6 EC 气凝胶高抗盐性机理分析	34
3.3.7 EC 气凝胶户外测试性能研究	34
3.4 本章小结	35
第 4 章 茄子/聚吡咯复合气凝胶光热水蒸发协同重金属离子吸附性能研究	36
4.1 引言	36
4.2 结果与分析	36
4.2.1 形貌、润湿性分析	36
4.2.2 结构特征和元素分析	40
4.2.3 材料力学性能分析	41
4.2.4 吸光度、导热系数分析	43
4.3 PPy@eggplant 气凝胶光热转换性能	44
4.3.1 聚吡咯含量对光热水蒸发性能的影响	44
4.3.2 材料厚度对光热水蒸发性能的影响	46
4.3.3 PPy@eggplant 气凝胶水蒸发及重金属离子吸附性能	46
4.3.4 PPy@eggplant 气凝胶的水蒸发和重金属离子吸附的同时性能	49
4.3.5 PPy@eggplant 气凝胶同时水蒸发和重金属离子吸附机理分析	50

4.4 本章小结	51
第 5 章 结论与展望	53
5.1 结论	53
5.2 展望	53
参考文献	55
攻读硕士学位期间取得的科研成果	66
致 谢	67

第 1 章 绪 论

1.1 概述

水资源，尤其是淡水资源，是人类生存和发展的关键要素^[1]。尽管地球表面约 70% 被水覆盖，但其中绝大部分是海水，而可用的淡水资源仅占 2.5%^[2]。随着全球工业化和城市化的加速，淡水需求急剧增加，导致水资源短缺问题日益严重^[3]。太阳能驱动光热水蒸发是一种基于可再生能源的水净化技术，通过利用太阳能实现蒸发过程，从而分离水与杂质；该技术具有高效、低能耗、结构简单以及对环境影响极小的显著优势^[4]；其核心过程包括太阳能的吸收与转化、水的输送以及水蒸气的生成与收集。在太阳能驱动光热水蒸发技术中，光热转化材料的选择至关重要。理想的光热转化材料应具备高效的光吸收能力、易于制备、良好的稳定性以及优异的生物兼容性等特点^[5]。目前，该领域广泛应用的光热转换材料主要包括等离子体金属材料^[6]、有机聚合物材料^[7]、半导体材料^[8]和碳基材料^[9]；然而，这些材料在实际应用中仍面临一些挑战，例如成本较高、制备工艺复杂以及生物兼容性不足等问题^[10]。因此，开发新型高效、低成本且环境友好的光热转化材料，成为推动太阳能驱动光热水蒸发技术进一步发展的关键研究方向。

与传统光热材料相比，生物质碳材料因其独特的自然结构、优异的物理化学性质、良好的稳定性以及对环境和人体的无毒性等优势，正逐渐成为研究热点^[11]。生物质材料凭借其独特的结构和化学组成，能够吸收并转化较宽波长范围的太阳能，展现出潜在的高效光热转化性能；此外，生物质材料的天然多孔结构和可调控的表面特性，使其在光吸收、水输送和蒸发效率方面表现出色，为太阳能驱动光热海水淡化蒸发技术的发展提供了新的方向^[12]。同时，得益于其天然的多孔结构和优异的吸附性能，功能化生物质材料可以作为光热转换材料和良好的吸附剂，有效进行清洁水生产和去除废水中的有害物质^[13]。通过将光热转化与吸附性能相结合，为可持续的水资源管理提供了创新的解决方案。聚吡咯（PPy）是常用的共轭聚合物，具有易合成、良好的生物相容性和离子交换特性，可用于重金属离子的吸附^[14]。除吸附性能外，PPy 还具有优异的光热转换特性，生物相容性强，可作为光热转换材料在太阳能界面蒸发中生产清洁水^[15]。

因此，本课题先通过碱处理生物质茄子基体、然后进行冷冻干燥，碳化工艺制备了茄子碳（Eggplant carbon, EC）气凝胶，应用于海水淡化领域生产清洁水。同时，茄子碳气凝胶制备过程能耗高、力学性能差和无形状回复能力等特点，是目前需要进一步改善的。因此，本课题进一步原位聚合茄子气凝胶构建了茄子/聚吡咯（Polypyrrole-modified natural eggplant, PPy@eggplant）复合气凝胶，通过茄子和 PPy 之间形成的氢键来改善气凝胶的力学性能，降低了能耗，实现了优异的形状回复能力。基于 PPy 的双重属性，将其应用于光热水蒸发重金属离子废水的清洁水生产和重金属

离子吸附。

1.2 太阳能光热转换材料分类

太阳能光热转换材料吸收太阳能转化热能，是提高界面蒸发装置蒸发速率的关键所在。随着太阳能光学技术的发展，这些年科研人员对光热转换材料的研究与应用有了很大的进展。目前所开发的光热转换材料主要分为以下几种：等离子体金属材料、有机聚合物材料、半导体材料和碳基材料^[16]。

1.2.1 等离子体金属材料

等离子体金属材料包括金、银、铂等，以其卓越的光热特性和优异的光吸收效率而著称，其能够有效地将光能转化为热能，这一现象归功于其独特的等离子体激元共振效应^[17]。当太阳光的入射频率与金属内部电子的固有振动频率达到一致时，电子会集体响应并进入激发共振状态，这种共振现象促使电子动能转化为热能，从而实现了光能向热能的转变。研究已证实，通过调控金属纳米粒子的形态、构造、尺寸、排布及密度等参数，可以精确调节材料的共振波长，从而有效优化金属纳米粒子的光热转换效率^[18]。

Halas 等人^[19]率先探索了金属纳米粒子材料的在太阳能界面蒸发领域应用潜力。他们创新性地将金属纳米颗粒分散于水中，以此机制生成蒸汽。研究发现，在环境温度下，当这些纳米颗粒分散于水体时，大部分能量被用于促进周围水分子蒸发形成蒸汽，而仅有少量能量用于加热水体本身。这一开创性的研究成果为后续金属材料在太阳能界面水蒸发技术中的研究与应用奠定了重要基础。

Zhang 等人^[20]以芳纶纳米纤维为载体，在其表面原位生长纳米银粒子，并与二硫化钼共混，利用冰模板法制备了二硫化钼/纳米银粒子@芳纶纳米纤维复合气凝胶。复合气凝胶具有高效的光吸收性能（在可见光区达到 93.58%），在 5 个太阳光强度下 50 min 后表面温度可升至 74.66 °C，界面水蒸发速率最高达到 11.7 kg·m⁻²·h⁻¹，6 次循环蒸发速率平均为 11.34 kg·m⁻²·h⁻¹，表现出良好的循环稳定性。

Zhu 等人^[21]开发了一种基于自组装技术的宽带等离子体蒸发器，该蒸发器通过一步沉积过程制备在纳米孔模板上，具有极高的光吸收效率，可达 99%。这一性能显著优于传统的多路复用等离子体纳米结构，能够直接应用于高效的太阳能界面水蒸发。等离子体金属材料作为光热材料，存在成本高、制备工艺复杂、回收率低等问题，同时在水中上浮的过程中，部分热量会传递给周围水体，导致能量损失。

1.2.2 有机聚合物材料

研究较多的有机聚合物材料有聚吡咯^[22]、聚多巴胺^[23]、聚苯胺^[24]、聚噻吩^[25]等。它们制备工艺简单、成本低廉、宽吸收光谱，同时具有良好的加工性，能够均匀覆盖在不同载体表面。有机聚合物因其优异的光吸收性能，当太阳光照射到材料表面时，有机聚合物中丰富的电子会从基态跃迁到更高能级的轨道，随后通过无辐射弛豫和分子振动的方式将能量以热能形式释放，从而实现高效的光热转换^[26-28]。与其他材料相比，有机聚合物材料通常具备显著的生物相容性、低毒性以及可生物降解性，同时其合成工艺简单，易于大规模生产和应用。

Zhao 等人^[29]选择一种轻质商用聚氨酯泡沫作为支撑物，用黑色聚吡咯层改性，以获得简单有效的光热转化聚吡咯-聚氨酯“黑色泡沫”。由于聚吡咯层优异的光谱吸收能力以及表面的聚吡咯微皱纹，当受到太阳光照射时，黑色泡沫的表面温度迅速升高；结合聚氨酯泡沫的多孔结构、低导热性和亲水性，它可以连续用于海水淡化和水净化目的；在 4 个太阳照射下，水的蒸发速率可达 $3.789 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ；在 1 个太阳照射下，蒸发效率为 86.9%。

Lu 等人^[30]提出利用基于静电纺丝和化学交联方法并负载高吸光能力的聚多巴胺，优化设计一种高效聚多巴胺/聚乙烯醇复合纳米纤维水凝胶界面蒸发器。在 1 个标准太阳光强度下，聚多巴胺/聚乙烯醇复合纳米纤维水凝胶蒸发界面具有高达 $1.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和 82.2% 的光热转换效率，同时还具有优异的耐盐性、耐久性和良好的自清洁性能。

Wang 等人^[31]设计了一种基于聚苯胺/碳纳米管织物的悬挂式太阳能蒸发器，其中光热织物充当太阳能蒸发器，棉织物上的微孔充当水转移通道。悬挂模式通过大大减少散热面积，在两个界面上提供高效的蒸发；悬挂式聚苯胺/碳纳米管织物太阳能蒸发器在 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的太阳光照下可实现 $2.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和 91.74% 的光热效率。

1.2.3 半导体材料

使用比较广泛的半导体材料有二氧化钛^[32]、三氧化钼^[33]、三氧化二钛^[34]和四氧化三铁^[35]等多种金属氧化物。半导体材料通过电子激发和能量跃迁实现光热转换，当入射光照射到半导体材料时，由于其带隙能量较低，光子能量足以激发电子从价带跃迁到导带，形成电子-空穴对，被激发的电子通过弛豫过程回到低能级，并将多余的能量以热量的形式释放出来，从而实现光能向热能的转化^[36-37]。

Du 等人^[38]以红树林为灵感，采用结构工程设计合成多能级反射氮化钛/二氧化钛@碳布纳米管阵列。空心的二氧化钛纳米棒可以促进快速的水传输，而氮化钛/二氧化钛阵列可以作为局部表面等离子体共振增强的多级反射结构，用于太阳能收集；氮化钛/二氧化钛@碳布纳米管蒸发器，在 1 个太阳光照射下表现出 $2.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高蒸发速率。

Wang 等人^[39]通过一锅法成功制备了一种低成本、稳定的双等离子体 3D 类海胆氮化钛/三氧化钼复合材料。等离子体氮化钛纳米颗粒和原位生长的等离子体三氧化钼纳米棒结构的组合显著提高了太阳光吸收和光热转换效率；氮化钛/三氧化钼复合蒸发器，在 1 个太阳光照射下，其蒸发速率高达 $2.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，转换效率为 106.7%。

Li 等人^[40]通过三氧化二钛/聚氨酯的原位发泡和聚丙烯酰胺的聚合反应制备了一种具有三维分层结构的光热蒸发器。由于球磨三氧化二钛的高光热转化率、聚氨酯优异的保温性能和聚丙烯酰胺良好的输水能力的协同效应，所制备的水凝胶光热蒸发器表现出优异的海水淡化能力。特别地，三氧化二钛/聚氨酯/聚丙烯酰胺蒸发器，在 1 个太阳光照射下，海水蒸发效率为 $2.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，转换效率为 140.42%。

Zhao 等人^[41]利用半乳露聚糖、聚丙烯酰胺、氧化石墨烯和四氧化三铁纳米颗粒开发了一种具有高机械强度、高水分蒸发速率和光电转换性能的互穿网络水凝胶蒸发器。其中，聚丙烯酰胺与交联剂形成三维交联网络结构，而半乳露聚糖中甘露糖支链上的顺

式羟基形成硼酸酯键交联网络,增强了体系的机械性能;均匀分散在蒸发器中的氧化石墨烯和四氧化三铁纳米颗粒可以为水分蒸发提供显著的光热转换效率;在 1 个太阳光照射下,其蒸发速率高达 $2.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,转换效率为 90.7%。

1.2.4 碳基材料

碳基材料因其优异的光热转换性能成为研究热点。例如,石墨烯^[42]、氧化石墨烯^[43]、活性炭^[44]、碳纳米管^[45]以及生物质碳^[46]等材料。与有机聚合物类似,碳基材料同样通过分子热振动实现光热转换;当碳材料吸收太阳光后,其共轭 π 电子会从基态跃迁到激发态,这些被激发的 π 电子通过弛豫过程释放热量并回到基态,从而将光能高效转化为热能。碳材料具备优异的太阳光吸收性能,稳定的物理化学结构、自身结构可调控的特点,被认为是一种广泛使用的光热转换材料。

Li 等人^[47]利用还原氧化石墨烯作为掺杂剂制备了硫化铜/还原氧化石墨烯颗粒,并将其作为光热转换材料与聚乙烯醇共混交联,制备了具有多孔结构的硫化铜/还原氧化石墨烯/聚乙烯醇光热转换水凝胶;在 1 个太阳光下,多孔水凝胶的固含量为 10%的试样性能最优,模拟海水蒸发速率为 $1.59 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

Wu 等人^[48]通过在商业棉织物上构建石墨烯/聚乙烯醇杂化水凝胶,开发了一种具有 3D 互连孔结构的新型不对称光热水凝胶织物,石墨烯/聚乙烯醇杂化水凝胶织物不仅在盐水蒸发中表现出边缘优先的盐溶解,而且还在多孔水凝胶织物表面诱导形成离散的盐风化。这一独特功能有助于在连续长时间界面太阳光蒸发测试中实现高且可重复的蒸发性能,在 2D 平台上分别从 10 至 26 wt.% NaCl 溶液实现 1.70 和 $1.44 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率。

Mnoyan 等人^[49]利用一种市售的低成本材料活性炭,通过简便的过滤和喷涂方法开发出高效光热层,无需任何额外加工即可生成颗粒内多孔结构。以活性炭为基础的光热层在 1 个太阳光下,蒸发速率为 $1.17 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;在活性炭上涂覆 4.7 wt.%的聚乙烯亚胺后,在 1 个太阳下产生的蒸汽量提高了 8.5%,相当于 $1.27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的水蒸发效率和 85.66%的光热转换效率。

Ge 等人^[50]将多壁碳纳米管、聚二甲基硅氧烷和聚乙烯醇海绵进行组合,只需要喷涂工艺,即可获得上层疏水、下层亲水的 Janus 结构太阳能界面蒸发体。该蒸发体具备良好的吸水性能、自漂浮性能、光热性能、蒸发性能及抗盐性能,光吸收率最高达到 98.4%,在辐照度为 $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ 的光照条件下,表面温度可达 74°C ,最大蒸发速率可达 $1.79 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,为无蒸发体容积式蒸发速率的 3.9 倍。当氯化钠质量分数为 3.5 wt.%时,连续蒸发 10 h 后,蒸发界面无盐晶体析出,蒸发速率最高为 $1.68 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

1.3 生物质材料在光热转换应用中的研究现状

生物质具有的天然孔洞在亲水导水方面具有得天独厚的优势,同时生物质也满足低导热低密度的要求,通过简单制备工艺对生物质进行碳化或涂层处理就能拥有宽波段的太阳光吸收,因此,近些年出现了一大批生物质光热材料^[51-59]。

Zhu 等人^[55]通过对生物质白萝卜进行碳化,制备出一种高效太阳能蒸发器。碳化白

萝卜具有高度发达的蜂窝状结构和亲水性特点，能有效吸收 93.5% 以上的太阳光，并能快速输水和增强传热。在 1 个太阳光照射下，水蒸发速率高达 $1.57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，蒸发效率为 85.9%；对于不同类型的原水（包括海水和染料废水），净化后的水符合饮用水标准。

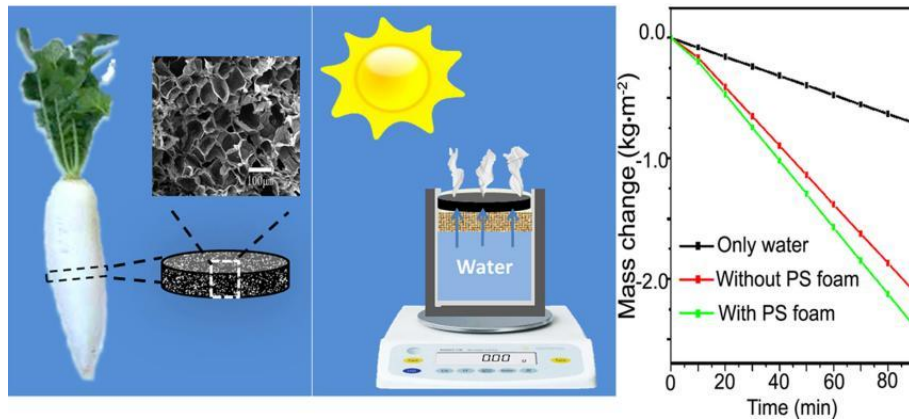


图 1-1 表面碳化白萝卜蒸发器及蒸发速率^[55]。

Fig. 1-1 Surface carbonized white radish evaporator and evaporation rate^[55].

Zhu 等人^[56]制备了一种具有双层结构的可持续、高效且易于使用的丝瓜络太阳能蒸发器。顶部碳化层用作高效的太阳能吸收剂，具有广泛的光吸收和光捕获性，底层由于丝瓜纤维的天然亲水性和分层大孔和微通道，将足够的水输送到局部加热界面；在海水淡化过程中，大孔和微通道之间的盐浓度梯度允许在丝瓜络中有效排出盐分，并防止盐分在蒸发器表面积聚，从而确保长期稳定性。其在 1 个太阳光照射下，蒸发速率为 $1.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、蒸发效率为 89.9%。



图 1-2 用于太阳能海水淡化的新鲜和碳化丝瓜络^[56]。

Fig. 1-2 Fresh and carbonized loofah used for solar desalination^[56].

Li 等人^[57]通过调控表面碳化过程，制备了高性能多孔木材碳化太阳能蒸发器。表面不同碳化程度处理显著影响光热转换特性，进而影响太阳能界面水蒸发的蒸发效率。在 1 个太阳光照射下，该蒸发器表现出低导热系数 ($0.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)、高太阳能吸收率 (92.5%)、高表面温度 (49.5°C) 和蒸发效率 (78%)。

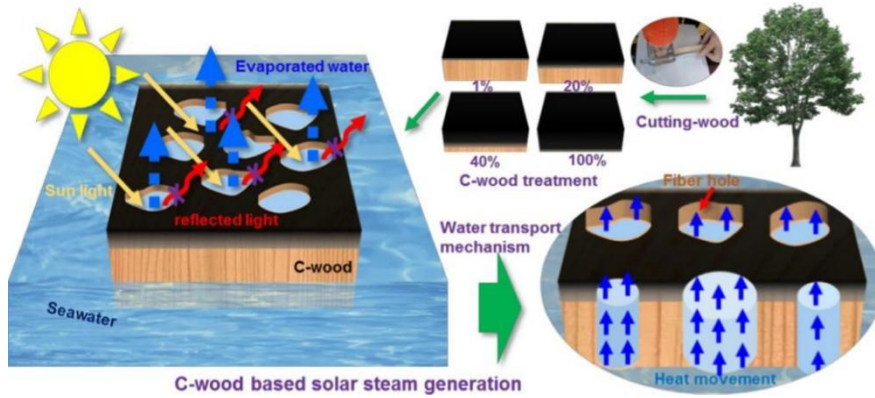


图 1-3 用于海水淡化和净化的碳化木材太阳能蒸汽蒸发^[57].

Fig. 1-3 Carbonized wood based solar steam evaporation for seawater desalination and purification^[57].

Li 等人^[58]在室温下通过简便的原位聚合方法开发了双层生物质太阳能界面蒸发器——聚吡咯-高粱秸秆蒸发器。通过在天然高粱秸秆的横截面上涂覆聚吡咯，上层聚吡咯在 200-2500 nm 范围内可实现约 96%的光吸收，并将光能转化为热能蒸发水分；较低的高粱秸秆层可以为聚吡咯层提供持续的水供应，并将热量集中在聚吡咯层上；在 1 太阳光照射下，聚吡咯-高粱秸秆蒸发器的蒸发速率达到 $1.385 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、蒸发效率达到 81.9%。

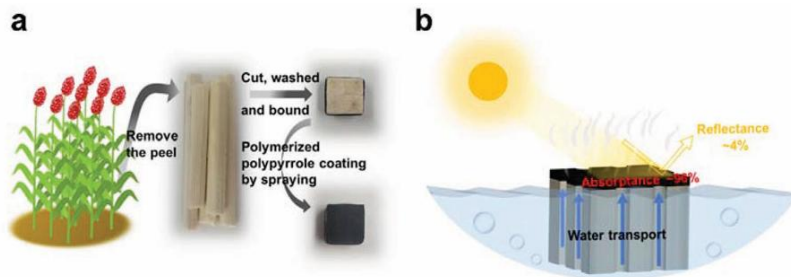


图 1-4 a) 聚吡咯-高粱秸秆蒸发器的制备示意图; b) 太阳能蒸汽蒸发示意图^[58].

Fig. 1-4 a) Schematic diagram for preparation of polypyrrole-sorghum straw evaporators. b) Schematic illustration of solar steam generation^[58].

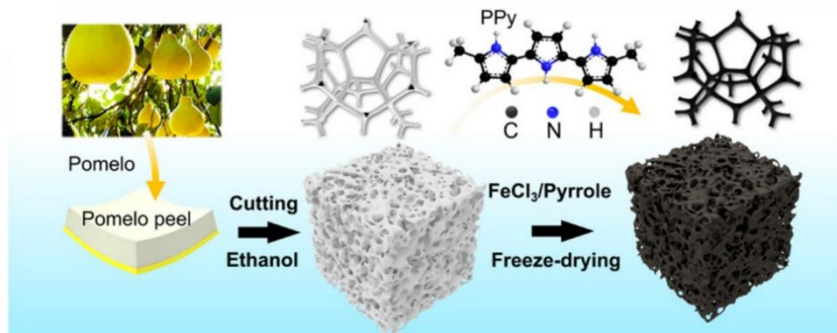


图 1-5 用于光热太阳能吸收器的聚吡咯功能化柚子皮制造示意图^[59].

Fig. 1-5 Schematic illustration of the fabrication of polypyrrole-functionalized pomelo peel for a photothermal solar absorber^[59].

Zhang 等人^[59]通过共轭聚吡咯聚合物和自模板柚皮的合理组合，以简单易行的方式制造了一种环保且生物相容的光热海绵蒸发器，对太阳光的吸收率超过 95%；在 1 个太阳光照射下，蒸发速率为 $1.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。其制备形式非常简单，能耗低，成本低；以食物垃圾为基础的柚子皮具有丰富的毛细孔结构，可以连续供水/吸附有机物；聚吡咯改

性柚子皮光热海绵可用于实现太阳能驱动的界面水蒸发,并进一步太阳能驱动加热去除重质原油。

1.4 生物质茄子材料在光热转换中的研究现状

茄子是茄科茄属的一种植物,来源广、产量高、成本低、易获取的天然生物质材料。同时,茄子具备良好的生物相容性、易降解等特点,所以以茄子为基体的生物质材料同样具备来源丰富、成本低廉、生物相容性好、易降解等优点^[60]。这使得茄子基材料在超级电容器^[61]、储能相变材料^[62]、光催化^[63]、保温隔热^[64]等领域具备较多的优势。而茄子基的多孔材料通过简单的碳化和涂层处理,就可以获得宽波段的光吸收,在光热转换领域同样有巨大的应用前景。

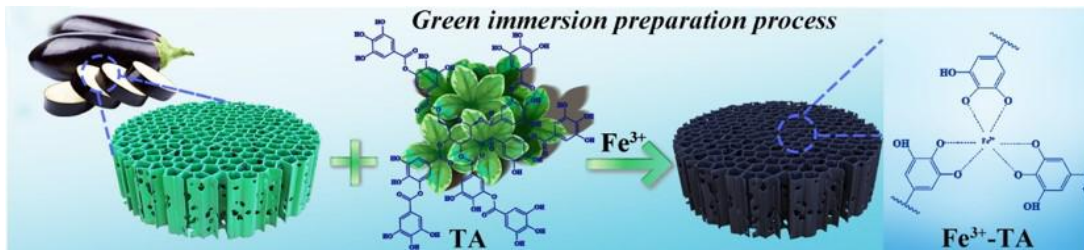


图 1-6 四氧化三铁/单宁酸@茄子气凝胶的制备工艺^[65]。

Fig. 1-6 Fabrication process of tri-iron tetraoxide/tannic acid@eggplant aerogel^[65]。

Zhu 等人^[65]通过简单的湿化学浸泡工艺,制备了一种由多孔气凝胶(茄子)和光吸收剂四氧化三铁/单宁酸组成的全生物质绿色太阳能界面蒸发器,用于低成本高效海水淡化。四氧化三铁/单宁酸@茄子气凝胶由于其独特的海绵状多孔结构、广泛的阳光吸收能力和优异的光热效应,在 1 个太阳光照射下,水分蒸发速率($1.61 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)和蒸发效率(87.10%)。四氧化三铁/单宁酸@茄子气凝胶的天然 Janus 皮核结构具有定向二维输水通道,可促进光热脱盐过程中水的输送,减少传热损失。此外,由于大孔结构和 Janus 润湿性的优势,即使在高浓度盐水的脱盐过程中,气凝胶也能保持恒定的蒸发速率并表现出优异的自脱盐能力。

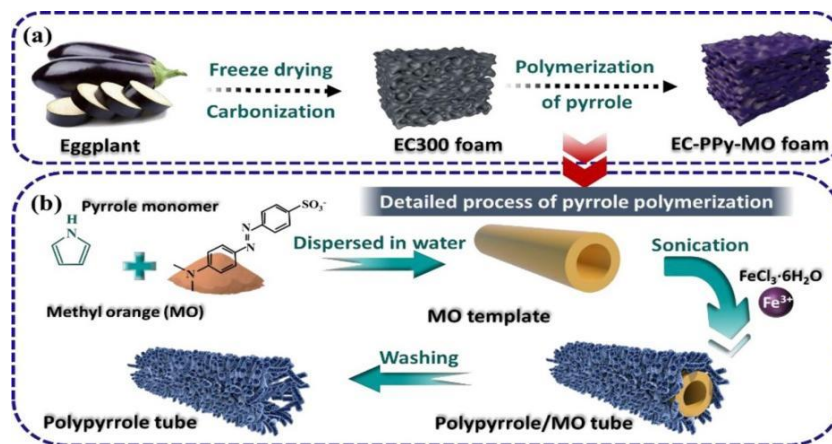


图 1-7 a) 茄子碳/聚吡咯/甲基橙泡沫的合成路线; b) 在茄子碳/聚吡咯/甲基橙泡沫上进行管状聚吡咯聚合的详细过程^[66]。

Fig. 1-7 a) The synthetic route of eggplant carbon/polypyrrole/methyl orange foam; b) detailed process of tubular pyrrole polymerization on eggplant carbon/polypyrrole/methyl orange foam^[66]。

Kong 等人^[66]采用甲基橙模板在生物质茄子碳泡沫上通过化学氧化原位沉积聚吡咯制备了茄子碳/聚吡咯/甲基橙泡沫蒸发器。由于具有细长管状形态的聚吡咯的波导效应

和生物质基质中的分层微纳米结构，茄子碳/聚吡咯/甲基橙泡沫在宽波长范围内表现出高光吸收能力（~91%）；茄子碳/聚吡咯/甲基橙泡沫有助于稳定薄水膜，以提供高效的蒸发界面表面并确保有效的隔热；在1个太阳光照射下，茄子碳/聚吡咯/甲基橙泡沫蒸发器的蒸发速率约 $1.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ；同时，蒸发器可以在 NaCl 盐度为 7 wt.% 的溶液中保持高效蒸发且不会结垢，而当盐水浓度高于 15 wt.% 时，会出现大部分盐结垢；然而，漂浮在 25 wt.% 盐水中的茄子碳/聚吡咯/甲基橙蒸发器可以连续蒸发 72 h，且不会有明显的盐垢积累，蒸发速率最高可达 $\sim 2.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，这是因为 3D 茄子碳/聚吡咯/甲基橙泡沫蒸发器的外露表面可以消除边界马兰戈尼现象，从而不会出现明显的盐垢，而外露的冷蒸发表面则提高了茄子碳/聚吡咯/甲基橙泡沫的蒸发速率。

1.5 本论文的主要内容与创新点

1.5.1 本论文的主要内容

基于以上综述，本课题的主要研究内容有以下几点：

（1）茄子基气凝胶的制备及性能表征。通过碱处理、冷冻干燥、碳化工艺制备了 EC 气凝胶。通过碱处理、冷冻干燥、原位聚合制备了 PPy@eggplant 气凝胶。通过 SEM、超景深、FTIR、XRD、XPS、EDS、Raman、BET 等表征方法分析两种茄子基气凝胶的微观形貌、结构特征、导热系数、孔隙率、吸光度等性能，并对两种气凝胶光热水蒸发性能及其清洁水生产性能进行表征分析。

（2）EC 气凝胶太阳能光热水蒸发性能研究。探究不同碳化温度 EC 气凝胶的水蒸发效果，以纯水和茄子气凝胶蒸发速率为对照，确定最优碳化温度的 EC 气凝胶。利用最优碳化温度的 EC 气凝胶，探究气凝胶厚度对水蒸发性能的影响，确定最优厚度。对不同浓度的盐水进行水蒸发实验并测试其抗盐性，以分析 EC 气凝胶的水蒸发效率和耐盐性能。建立芯吸实验、理论方程和数值模拟探究 EC 气凝胶快速水传输性能和快速回流性能。综合以上研究内容，提出 EC 气凝胶的高抗盐机理。

（3）PPy@eggplant 气凝胶光热水蒸发性能研究。探究不同 PPy 含量的 PPy@eggplant 气凝胶进行水蒸发性能，以纯水蒸发速率为对照，确定最优 PPy 比例的 PPy@eggplant 气凝胶。利用最优 PPy 含量的 PPy@eggplant 气凝胶，探究气凝胶厚度对水蒸发性能的影响，确定最优厚度。将最优比例的 PPy@eggplant 气凝胶用于不同染料溶液的蒸发实验，以研究各染料水溶液的蒸发速率。探究最优比例的 PPy@eggplant 气凝胶用于不同重金属离子溶液的蒸发实验，以研究各重金属离子水溶液的蒸发速率。将最优比例的 PPy@eggplant 气凝胶用于含有重金属离子的染料废水的蒸发实验，以研究其光热 1 h 同时水蒸发速率和重金属离子静态/动态吸附性能。同样地，研究最优比例的 PPy@eggplant 气凝胶对含有重金属离子的染料废水的光热水蒸发及其静态/动态饱和吸附量性能。综合以上研究内容，分析阐明了 PPy@eggplant 气凝胶同时水蒸发和重金属离子吸附机理。

1.5.2 本论文的主要创新点

茄子基气凝胶所具有的低密度、高孔隙率等特性，能有效地捕获太阳光，提供良好的水供应。通过碳化工艺、原位聚合制备的茄子基气凝胶，可充分在海水淡化与清洁水

生产等领域发挥作用。本课题研究的特点与创新之处为：

（1）通过碱处理、冷冻干燥、碳化工工艺，成功构建高孔隙率、超亲水性、快速供水和回流的高抗盐 EC 气凝胶。并结合数值模拟、理论方程和实验结果，分析了其高抗盐机理，为高性能生物基气凝胶构建及其在海水淡化中应用提供一定实践和理论基础。

（2）通过碱处理、冷冻干燥、原位聚合，成功构建高孔隙率、超亲水性、低导热系数、光热水蒸发协同重金属离子吸附的 PPy@eggplant 气凝胶。系统表征分析了其物化性能和光热水蒸发协同重金属离子吸附性能，为高性能生物基气凝胶构建及其在水蒸发协同去除蒸发介质有害物质的应用提供一定的理论基础和借鉴意义。

第 2 章 茄子基多孔材料的构建及测试方法

2.1 引言

茄子成分主要由纤维素、半纤维素和果胶构成，具有天然的相互连接的孔隙结构和丰富的碳基纤维，良好的机械性能、生物可降解性和生物相容性^[67]。生物质茄子基多孔材料不仅具备低密度、高孔隙率的多孔特性，还结合了生物质材料的生物相容性，可降解性和良好的机械性能，为高性能茄子基多孔材料光热蒸发器的构建及应用奠定了基础。生物质多孔碳材料，其高的比表面积、丰富多孔结构，优异光吸收能力，低导热系数，强大的芯吸能力，可促进太阳能界面水的蒸发，是一种理想的光热转换材料^[68-69]。聚吡咯（PPy）是一种常见的导电共轭聚合物，具有优异的光热转换特性，易于加工、合成和改性，表现出良好的分散性，优异的光稳定性可以实现对光的吸收范围精准调控，使其成为优选的光热转换材料^[15,70]。此外，PPy 具备良好的生物相容性和离子交换特性，其电子亲和性、离子交换能力和大的多孔分子结构，可用于重金属离子的吸附^[14,71]。

因此，本章通过碱处理、冷冻干燥、碳化、原位聚合工艺制备了两种茄子基气凝胶，并对其性能进行表征。主要内容有：（1）茄子碳（Eggplant carbon, EC）气凝胶的构建及其性能表征。通过碱处理、冷冻干燥、碳化工艺制备得到 EC 气凝胶。随后，对 EC 气凝胶形貌、结构特征、润湿性能、孔隙率、吸光性能、导热系数、水传输和回流性能、户外性能等性能进行表征。最后，使用实验室自制的蒸发装置系统进行太阳能界面水蒸发性能测试。（2）茄子/聚吡咯（Polypyrrole-modified natural eggplant, PPy@eggplant）复合气凝胶的构建及其性能表征。通过碱处理、冷冻干燥、原位聚合制备得到 PPy@eggplant 气凝胶。对 PPy@eggplant 气凝胶形貌、结构特征、润湿性能、孔隙率、吸光性能、水传输性能、重金属离子吸附性能、热量损失等进行表征。最后，使用实验室自制的蒸发装置系统进行 PPy@eggplant 气凝胶水蒸发性能测试。

2.2 茄子碳气凝胶的构建及其测试方法

2.2.1 实验材料和药品

原料茄子（紫黑色长茄）购买自当地市场，氯化钠（NaCl, AR, 99.5%）、无水氯化钙（CaCl₂, AR, 96.0%）氯化钾（KCl, AR, 99.5%）购自中国上海阿拉丁生化科技股份有限公司，氢氧化钠（NaOH, AR）购自中国上海国药化学试剂有限公司，无水硫酸镁（MgSO₄, 99%, mental basis, 120.37 (MW)）购自中国上海麦克林生化科技有限公司，活性红 3BSN 购自浙江瑞华化工有限公司，去离子水由实验室自制，所有药品均未进一步处理。

2.2.2 EC 气凝胶的制备

如图 2-1，EC 气凝胶的制备工艺路线：①茄子基体碱处理：将去皮的茄子切成厚度为 10 cm 以上的切片，用 1 g/L NaOH 水溶液浸泡处理切片 4 h 左右，随后用去离子水超声处理茄子切片三次，每次 15 min。②茄子基气凝胶的制备：将碱处理的茄子切片在

-18 °C以下的冰箱中进行预冻处理 12 h 以上，然后在-35 °C以下的冷冻干燥机中进行冷冻干燥 48 h 以上，以制备茄子基气凝胶。③EC 气凝胶的制备：将用锡箔包裹的茄子基气凝胶在管式炉中碳化，在保护 N₂ 气氛下，以 2 °C/min 升温至 200 °C并保温 75 min 进行预碳化，随后以 5 °C/min 的速率升温至不同的温度(550、650 和 750 °C)，保温 90 min。碳化结束后，冷却至室温，取出，将样品分别命名为 EC-550、EC-650 和 EC-750，装入密封袋备用。

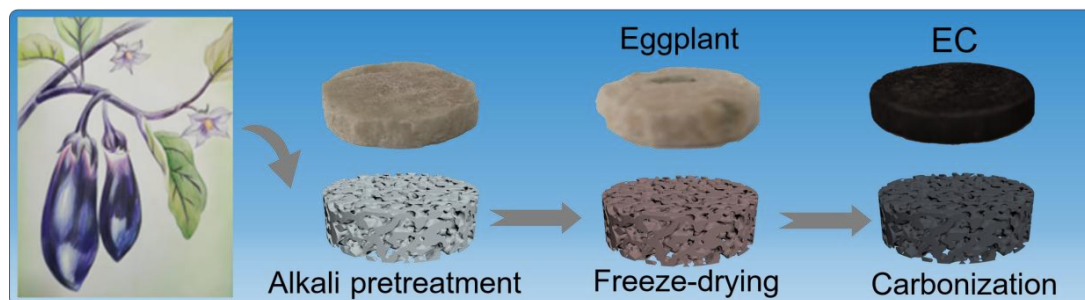


图 2-1 EC 的制备工艺路线.

Fig. 2-1 The preparation process route of the EC.

2.2.3 材料测试与表征方法

2.2.3.1 扫描电子显微镜测试和 X 射线能谱测试

通过场发射扫描电子显微镜 (FESEM, Hitachi S4800, 日本) 研究了 EC 气凝胶不同倍镜下的微观结构与形貌特征，设置的加速电压为 10 kV，电流为 7 mA。通过 X 射线能量色散谱仪 (EDS, CIQTEK SEM3200, 中国) 研究了 EC 气凝胶表面的元素分布，选择 mapping 全扫模式。

2.2.3.2 傅里叶红外光谱测试和 X 射线光电子能谱测试

通过傅里叶变换红外光谱 (FTIR, Thermo Scientific Nicolet 6700, 美国) 研究了 EC 气凝胶中的分子结构和官能团，设置的扫描波长为 500-4000 cm⁻¹，测试分辨率为 32 s⁻¹。通过 X 射线光电子能谱 (XPS, Thermo Fisher ESCALAB 250 Xi, 美国) 研究了 EC 气凝胶中可能的化学键，设置工作电压 12 kV，灯丝电流 6 mA；全谱扫描通能为 150 eV，步长 1 eV；窄谱扫描通能为 50 eV，步长 0.1eV。

2.2.3.3 X 射线衍射测试和拉曼光谱测试

通过 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku Smartlab SE, 日本) 研究了 EC 气凝胶聚集态结构变化，采用 2θ 扫描，测试靶材为铜靶，扫描波长范围为 5-90°，扫描速度为 2°/min。利用拉曼光谱仪 (Raman, Horiba LabRAM HR Evolution, 日本) 对 EC 气凝胶的石墨化程度进行了分析，设置测试模式为常规模式，激光器波长为 532 nm，波数范围 250-4000 cm⁻¹，至少测量 3 个点位置。

2.2.3.4 表面润湿性能测试

采用接触角测量装置 (SDC-200S, 广东, 中国) 测量了 EC 气凝胶的静态水接触角，设置滴液 2 μl，静待时间 15 s，利用仪器配备的高速相机捕获静态接触角图像并记录静态接触角视频，每个样品测量 8-10 点位置，取接触角平均值表征 EC 气凝胶润湿性。

2.2.3.5 导热系数测试

通过热常数分析仪（Hot Disk TPS2500S，瑞典）对材料导热系数测试，设置测试点范围为室温，测试温度点 25 °C，每个温度点平行测试 3 次，测试气氛为空气。

2.2.3.6 孔隙率测试

使用毫米直尺和分析天平（精度 0.0001 g）分别测量 EC 气凝胶浸满水的尺寸（高度和直径）和样品浸满水前后的质量。EC 气凝胶的孔隙率（ ε ）是通过样品中孔的体积与样品总体积之比计算出来的，孔隙率的计算公式如下所示^[72]：

$$\varepsilon = \frac{\Delta M}{\rho V} \quad (\text{式 2-1})$$

其中， ΔM 为样品中饱和含水量（g）， ρ 为水的密度（1 g·cm⁻³）， V 为样品浸满水后的体积（cm³）。

2.2.3.7 吸光度测试

使用 UV-Vis-NIR 光谱仪（PerkinElmer, Lambda 950，美国）在 2500 ~ 200 nm 范围内进行测量，设置数据间隔为 2 nm，得到不同样品的反射光谱和透过光谱，根据 $A=1-R-T$ 计算总吸光度，利用以下公式计算不同样品的总吸光度^[73]：

$$\alpha = \frac{\int_{200}^{2500} I(\lambda)[1 - R(\lambda) - T(\lambda)]d\lambda}{\int_{200}^{2500} I(\lambda)d\lambda} \quad (\text{式 2-2})$$

其中 R 为反射率，T 为透过率。

2.2.3.8 力学性能测试

使用万能力学试验机（PT-1176SOG，广东宝大宣力科技有限公司）进行样品压缩强度的测试，应变设置为 60%，每个样品平行测试三次，取平均值作为最终值。此外，将质量为 300 g 的砝码平行放置在 EC 气凝胶表面上，24 h 后，观察其压力释放前后形状变化。并进一步将 EC 气凝胶放于鲜花的花蕊之上验证其低密度、质量轻的性能。

2.2.3.9 水传输能力测试

制备了长×宽×高约为 0.7 cm × 0.4 cm × 11.0 cm 的 EC 气凝胶来测定水传输能力。将 EC 气凝胶以悬挂的形式固定在铁架台上，底部放置一个含有红色水溶液的培养皿，并置于升降台之上。然后，逐渐升高升降台，直到 EC 气凝胶接触到红色溶液，观察并记录红色溶液随时间的推移而上升的高度。

2.2.3.10 快速回流测试

将 3 g 氯化钠和 0.1 g 活性红 3BSN 混合，溶解在适量的蒸馏水中。随后，将其放入 50 °C 的烘箱中，直到干燥，研磨备用。将适量的染色盐晶体溶解在烧杯中，形成过饱和的亮红色盐溶液。然后，用移液枪取 0.05 ml 过饱和红色盐溶液，滴在含有 3.5 wt.% 盐溶液的蒸发装置 EC 气凝胶表面。随后用摄像机记录过饱和盐溶液的回流过程。

2.2.3.11 太阳能蒸发器性能测试

通过实验室自制的太阳能光热水蒸发系统装置测试样品的蒸发性能，如图 2-2 所示，该系统由模拟光源（PL-XQ500W，中国北京）、实时记录电子天平（FX-3000i，日本）、

计算机 (DESKTOP, 中国惠普)、红外热成像仪 (C5, 美国)、蒸发装置 (实验室自制) 和光功率计 (NBET-RC22, 中国北京) 组成。其中: 太阳能模拟光源选用加装标准 AM 1.5G 光谱滤光片的氙灯作为光源; 电子天平分辨率为 0.01 g, 用于称量蒸发水的质量损失; 计算机用于实时记录电子天平示数, 获得蒸发装置的水质量变化; 红外热成像仪用于记录样品表面温度, 每 0, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 min 记录一次; 蒸发装置中, 在烧杯中的蒸发介质上, 使用可扩展性的中空聚苯乙烯泡沫支撑样品, 以减少热量损失到散装水。光功率计用于校准太阳能光强, 调节光源电流, 使其达到 1 个太阳光的强度。使用空调及加湿器控制环境温度和湿度, 测试环境为 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 和 $35 \pm 3\%$ 。每个样品至少进行 3 次蒸发测试, 取平均值做为最终值。

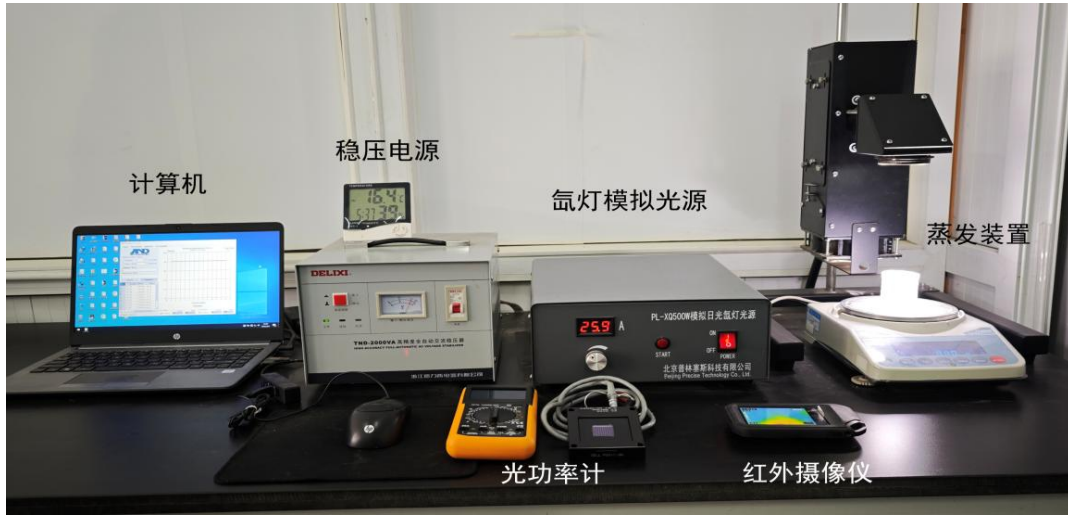


图 2-2 实验室自制太阳能水蒸发装置示意图.

Fig. 2-2 Laboratory home-made solar water evaporation device diagram.

太阳能光热界面水蒸发速率 (v , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) 的计算公式如下式中:

$$v = \frac{m_0 - m}{S \cdot t} \quad (\text{式 2-3})$$

其中, m_0 与 m 分别为装置蒸发前后的质量 (kg), S 为光热材料的蒸发面积 (m^2), t 为蒸发时间 (h)。

太阳能光热水蒸发转化效率 (η) 的计算公式如下式中^[73]:

$$\eta = \frac{m h_{LV}}{q_i} \quad (\text{式 2-4})$$

其中 m 为蒸发速率 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), h_{LV} 为 EC 气凝胶的焓值 ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$), q_i 为太阳光辐照的功率密度 ($1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)。EC 气凝胶的等效蒸发焓约为 $1958.0 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ (第 3 章 3.3.2 进行了讨论)。

(1) 盐水蒸发性能测试

分别配置 3.5%、10%、15%、20%、25 wt.% 的 NaCl 溶液, 将 EC 气凝胶放置在纯水和不同浓度 NaCl 溶液表面, 通过氙灯模拟太阳光进行水蒸发实验, 记录其光热水蒸发速率, 并计算其太阳能光热水蒸发转化效率。

(2) 循环稳定性测试

将 EC 气凝胶放置在 3.5%、15%、25 wt.% NaCl 溶液表面，超薄中空聚苯乙烯泡沫做支撑保温隔热层，分别进行 10 h 的光热循环稳定测试，记录蒸发过程中水蒸发质量损失的变化。

(3) 海水淡化性能测试

在 500 mL 去离子水中加入 13.8 g NaCl、2.8 g MgSO₄、0.45 g KCl 和 0.55 g CaCl₂，搅拌溶解 2 h，制备模拟真实海水。采用电感耦合等离子体发射光谱仪（Agilent 7850 型 ICP-MS，美国）检测蒸发前后 Na⁺、Mg²⁺、K⁺、Ca²⁺ 浓度。

(4) 户外性能测试

选择天气较为晴朗的白天，于学院天台楼顶进行户外水蒸发实验，将阵列式 EC 气凝胶放置在 20% NaCl 溶液表面，进行 10 h 的光热循环测试，记录其蒸发过程中水蒸发质量损失的变化。

2.2.4 等效蒸发焓的估算

正如之前的研究所报道的，多孔结构会降低水的蒸发焓^[75]。为了估算 EC 气凝胶的等效蒸发焓，在密封盒中进行了对比实验，保证相同的环境能量摄入（ U_{in} ），将去离子水加入到两个培养皿中（直径 60 mm，高度 12 mm），并将 EC 气凝胶放置在其中一个培养皿中。用精度为 0.0001 g 的天平，每隔 1 h 测定一次两个培养皿的质量变化，并计算出相应的蒸发速率。温度和相对湿度分别控制在 25 ± 2 °C 和 35 ± 3 %。EC 气凝胶的等效蒸发焓（ E_{equ} ）可以由以下等式估算：

$$U_{in} = E_0 m_0 = E_{equ} m_g \quad (\text{式 2-5})$$

其中 E_0 和 m_0 分别为纯水的蒸发焓（ $2256 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ）和质量变化， m_g 是 EC 蒸发系统的质量变化。

2.2.5 芯吸速率方程的推导

在以往文献研究的基础上，用理论方程进一步了解多孔介质中的芯吸现象^[76]。与毛细管相比，多孔介质中毛细芯吸的动力学尚未得到广泛的研究。在多孔介质中，相互连接的孔隙通道形成了复杂的拓扑结构和几何形状，使毛细芯吸的动力学行为显著。多孔介质的孔隙大小、形状和分布都非常复杂，与形状简单、管壁完全封闭的毛细管不同，多孔介质中的毛细管力不能简单地从平均孔径 R 中计算出来。我们设置了一个有效的孔径 R_{eff} 来描述毛细管力。那么，由多孔介质引起的毛细管力可以写为：

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{R_{eff}} \quad (\text{式 2-6})$$

当参考一般多孔介质中液体的动量方程时，可以使用达西定律。它给出了一个粘性压力损失：

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \frac{dh}{dt} \quad (\text{式 2-7})$$

在黏性力-重力主导型流动中，液体达到一定高度时，其自身重力的影响不再可以忽略。Fries^[77]等人证实当芯吸高度大于 0.1 倍平衡高度时，必须考虑自重力和粘性力。

其动态平衡方程为:

$$\frac{2\sigma\cos\theta}{R} = \frac{8\mu\dot{h}}{R^2} + \rho gh \quad (\text{式 2-8})$$

然后用 R_{eff} 代替 R , 用式 (2-7) 代替式 (2-8) 中的粘性阻力项, 结果是:

$$\frac{2\sigma\cos\theta}{R_{eff}} = \frac{\phi\mu\dot{h}}{K} + \rho gh \quad (\text{式 2-9})$$

由于多孔材料中粘性压力损失远远大于水的重力, 即 $\frac{\phi\mu\dot{h}}{K} \gg \rho gh$, 忽略水自身重力的影响, 即 $\frac{2\sigma\cos\theta}{R_{eff}} = \frac{\phi\mu\dot{h}}{K}$

$$\text{整理计算为 } h^2 = \frac{4\sigma\cos\theta \cdot K}{\mu\phi R_{eff}} \cdot t$$

$$h = \sqrt{\frac{4\sigma\cos\theta \cdot K}{\mu\phi R_{eff}} \cdot t} \quad (\text{式 2-10})$$

其中 h 为芯吸高度, $\dot{h}$ 为芯吸速率, σ 为空气-水表面张力 ($0.072 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$), θ 为水接触角, K 为多孔材料的渗透率, μ 为水的粘度 ($2.98 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$), ϕ 为孔隙率, R_{eff} 为平均孔径, t 为芯吸时间。EC 气凝胶相应的计算结果见表 2-1。

表 2-1 EC 气凝胶的拟合参数.

Table 2-1 Permeability of the fitted EC aerogel.

Sample	Length (cm)	Width (cm)	Hight (cm)	h (cm)	t (s)	θ	$R_{eff}(\text{m})$	ϕ (%)	K (m^{-2})
EC-550	0.7	0.4	10.5	6	9.3	0°	1.151×10^{-3}	93.27	4.00×10^{-6}
EC-650	0.7	0.4	11.5	6	8.0	0°	1.181×10^{-3}	97.99	4.31×10^{-6}
EC-750	0.7	0.4	12.3	6	10.2	0°	0.812×10^{-3}	92.17	2.79×10^{-6}

2.2.6 数值模拟

使用 COMSOL Multiphysics 软件 (5.6 版) 模拟了太阳能海水淡化中 EC-650 气凝胶的传热、水传输、相对水压力和盐度分布。EC-650 气凝胶结构可以近似视为重复的椭圆形胞状结构, 因此可以将二维模型离散为单个单元进行分析。

(1) EC-650 气凝胶中的水传输和相对水压力的 COMSOL 模拟

所建立模型的本质是流体在多孔介质中流动。将多孔介质的孔隙率近似为相等, 忽略变形和通道弯曲引起的复杂性, 推导出 EC-650 气凝胶中流体输运的稳态模型。EC 气凝胶内部的微孔网络和多孔通道中的水流体将作为可渗透的固体和流体。考虑到毛细通道对水的限制, EC-650 的水传输和相对水压力可以用以下公式描述:

$$0 = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad (\text{式 2-11})$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (\text{式 2-12})$$

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (\text{式 2-13})$$

式中 ρ 是密度, u 是速度矢量, p 是相对水压力, I 是二阶单位张量, K 是粘性应力张量, F 是水的重力, μ 是水的粘度, T 是水温。

(2) EC-650 气凝胶中的传热的 COMSOL 模拟

考虑到毛细通道中的水约束以及固体和流体之间的传热差异, EC 气凝胶传热模拟

包括固体传热和流体传热两部分，固体传热可以用以下方程来描述：

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ed} \quad (\text{式 2-14})$$

$$q = -k \nabla T \quad (\text{式 2-15})$$

$$Q_{ted} = -\alpha T: \frac{dS}{dt} \quad (\text{式 2-16})$$

式中 ρ 是密度， C_p 是恒压下的比热容， u 是速度矢量， T 是绝对温度， q 是传导热通量， Q 包含粘性耗散外的热源， Q_{ed} 是热弹性阻尼和固体中的热弹性效应， k 是热导率（当热导率是各向异性时是标量和张量）， α 是热膨胀系数， S 是第二 Piola-Kirchhoff 应力张量。

EC 气凝胶的流体传热可以通过下式描述：

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_p + Q_{vd} \quad (\text{式 2-17})$$

$$q = -k \nabla T \quad (\text{式 2-18})$$

$$\rho = \frac{p_A}{R_s T} \quad (\text{式 2-19})$$

$$Q_p = \alpha_p T (\partial p / \partial t + u \cdot \nabla p) \quad (\text{式 2-20})$$

$$Q_{vd} = \tau: \nabla u \quad (\text{式 2-21})$$

式中 Q_p 是压力变化所做的功，以及在绝热压缩和热-声效应下的加热结果， Q_{vd} 是流体中的粘性耗散， α_p 是热膨胀系数， τ 是粘性应力张量。

（3）EC-650 气凝胶中的盐度分布的 COMSOL 模拟

为了模拟盐离子在 EC-650 气凝胶内部微结构中的扩散和对流，进而观察气凝胶各部分的盐浓度分布，我们模拟了 EC-650 气凝胶的内部传质过程，模拟可以通过下式描述：

$$\nabla \cdot J_j + u \cdot \nabla c_j = R_j \quad (\text{式 2-22})$$

$$J_j = -D_j \nabla c_j \quad (\text{式 2-23})$$

式中 J_j 是相对于质量平均速度的质量通量， u 是质量平均速度矢量， c_j 是物质的浓度， R_j 是物质的反应速率表达式， D_j 是扩散系数。下方水体的盐浓度设定为 3000 mM (15 wt.%)。

2.3 茄子/聚吡咯复合气凝胶的构建及其测试方法

2.3.1 实验材料和药品

原料茄子（紫黑色长茄）从当地超市购买。吡咯（Py, 99%）、无水氯化铁（ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\geq 99.9\%$ ）、罗丹明 B（RhB, AR）、亚甲基蓝（MB, $\geq 70\%$ ）、甲基橙（MO, 96%）、六价铬标准溶液（ Cr^{6+} , 1000 $\mu\text{g/mL}$ in H_2O ）、镍离子标准溶液（ Ni^{2+} , 1 mg/mL, 0.005% HNO_3 ）、铜单元素溶液标准物质（ Cu^{2+} , 500 $\mu\text{g/mL}$, 1% HNO_3 ）、重铬酸钾标准溶液（ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 1/24 mol/L (0.25N)）购自中国上海阿拉丁生化科技有限公司，氢氧化钠（NaOH, AR）、六水合硫酸镍（ $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, AR）、五水合硫酸铜（ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, AR）购自中国上海国药集团化学试剂有限公司，去离子水由实验室净水系统（海泰仪器有限公司，中国）制备。

2.3.2 PPy@eggplant 气凝胶的制备

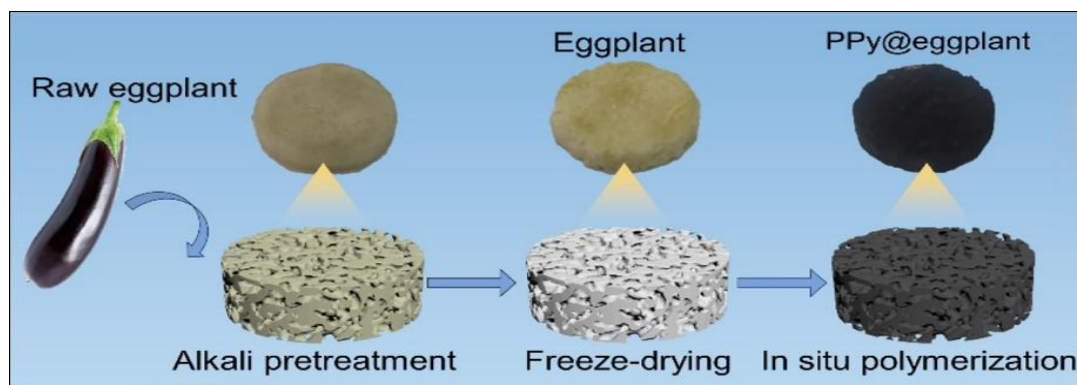


图 2-3 PPy@eggplant 气凝胶的制备工艺路线.

Fig. 2-3 The preparation process route of PPy@eggplant aerogel.

如图 2-3 所示, PPy@eggplant 气凝胶的制备工艺路线: ①茄子基体碱处理: 将去皮的茄子切成薄片, 在室温下用 1 g/L 的 NaOH 水溶液浸泡 4 h, 随后, 将切片用去离子水超声清洗 30 min, 以去除多余的 NaOH 残液。②茄子基气凝胶的制备: 将处理后的茄子薄片在冰箱中预冻, 然后放入冷冻干燥机中进行冷冻干燥, 得到茄子气凝胶。同时, 将原料茄子直接通过相同的工艺处理, 得到的气凝胶称为原始茄子气凝胶 (作为对照)。③PPy@eggplant 气凝胶的制备: 将不同 Py 质量的 (0.01、0.05、0.1、0.15 g) 加入到 40 mL 去离子水中, 搅拌 10 min, 将溶液与茄子气凝胶混合。随后, 将相应重量的 FeCl_3 (Py: FeCl_3 质量比为 1:2) 溶于 10 mL 去离子水中, 与制备好的吡咯溶液混合, 搅拌溶液 1 h 进行原位聚合。将制备的复合气凝胶用去离子水洗涤 2~3 次, 得到的不同 PPy 含量的气凝胶分别称为 PPy@eggplant-0.01、PPy@eggplant-0.05、PPy@eggplant-0.1、PPy@eggplant-0.15。

2.3.3 材料测试与表征方法

2.3.3.1 扫描电子显微镜测试和 3D 超景深显微镜测试

通过 2.2.3.1 扫描电子显微镜对 PPy@eggplant 气凝胶不同步骤的形貌进行研究。使用 3D 超景深显微镜 (VHXS600E, 日本) 观察 PPy@eggplant 气凝胶的三维结构形貌。

2.3.3.2 傅里叶红外光谱测试和 X 射线光电子能谱测试

按照 2.2.3.2 的方法进行测试。

2.3.3.3 X 射线衍射测试和 X 射线能谱测试

通过 2.2.3.3 X 射线衍射仪测定 PPy@eggplant 气凝胶的结构变化。通过 X 射线能量色散谱仪 (EDS, Xplore30, 英国牛津), 选择 mapping 全扫获得 PPy@eggplant 气凝胶表面元素分布。

2.3.3.4 表面润湿性能测试

按照 2.2.3.4 的方法进行测试。

2.3.3.5 导热系数测试

按照 2.2.3.5 的方法进行测试。

2.3.3.6 孔隙率测试

按照 2.2.3.6 的方法进行测试。

2.3.3.7 吸光度测试

按照 2.2.3.7 的方法进行测试。

2.3.3.8 力学性能测试

通过电子万能试验机（PT-1176SOG，广东宝大宣力科技有限公司）对茄子气凝胶和 PPy@eggplant 气凝胶进行力学性能测试，应变设置为 80%，每个样品平行测试三次，取平均值作为最终值。此外，将质量为 200 g 的砝码平行放在 PPy@eggplant 气凝胶表面上，24 h 后，观察其压力释放前后形状变化。并进一步将 PPy@eggplant 气凝胶放于鲜花的花蕊和蒲公英之上验证其低密度、质量轻的性能。最后，在水介质中，通过多次挤压和扭转 PPy@eggplant 气凝胶，观察其在水中的自我回复能力。

2.3.3.9 水传输能力测试

按照 2.2.3.9 的方法进行测试。其中 PPy@eggplant 气凝胶长×宽×高约为 0.7 cm×0.3 cm×10.5 cm。

2.3.3.10 比表面积测试

采用全自动比表面及孔隙度分析仪（Quantachrome Autosorb IQ，美国），以氮气为吸附源，脱气时间 8 h，获得 PPy@eggplant 气凝胶的吸附等温线。利用 BET 法由相对压力 $P/P_0 = 0.99$ 时 N_2 吸附量计算总孔容，并通过 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 方法进行孔径分布分析。

2.3.3.11 太阳能蒸发器性能测试

按照 2.2.3.11 的方法进行 PPy@eggplant 气凝胶光热水蒸发性能测试。

（1）纯水蒸发性能测试

制备不同吡咯浓度、不同厚度的 PPy@eggplant 气凝胶，将其放置在纯水溶液表面，通过氙灯模拟太阳光进行蒸发实验，记录其光热水蒸发速率，并计算太阳能光热水蒸发转化效率。

（2）废水蒸发性能测试

将 PPy@eggplant 气凝胶分别放置在 MO 溶液 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、MB 溶液 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、RhB 溶液 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、含有重金属离子的水 ($K_2Cr_2O_7$ $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 和 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 或含有 $K_2Cr_2O_7$ 的 MO 染料废水 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 表面进行太阳光界面蒸发实验，记录其光热水蒸发速率，并计算太阳能光热水蒸发转化效率。

（3）重金属离子净化性能测试

配制含 Cr^{6+} (50 mg/L)、 Cu^{2+} (50 mg/L)、 Ni^{2+} (50 mg/L) 的溶液，验证蒸发清洁水的质量。连续蒸发收集清洁水后，测试蒸发水中 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 离子浓度，并与国际标准进行比较。

2.3.3.12 重金属离子吸附率测试

使用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICPE-9000，日本岛津）测定溶液的离子浓度，将 PPy@eggplant 气凝胶分别放置在初始浓度均为 50 mg/L 的铬离子 (Cr^{6+})、铜离子 (Cu^{2+})、镍离子 (Ni^{2+}) 溶液上面，置于太阳模拟器下进行光照，磁力搅拌器恒温搅拌 (25°C , 240 r/min) 进行动态吸附实验。不使用搅拌器进行静态吸附平行实验。利用

以下公式计算离子的吸附率：

$$D_t = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \quad (\text{式 2-24})$$

其中， C_0 为初始溶液浓度（mg/L）， C_t 为吸附 1 h 时溶液浓度（mg/L）。

2.3.3.13 重金属离子饱和吸附量测试

使用电感耦合等离子体发射光谱仪，将 PPy@eggplant 气凝胶分别分别放置在初始浓度均为 50.0 mg/L 的铬离子（ Cr^{6+} ）、铜离子（ Cu^{2+} ）、镍离子（ Ni^{2+} ）溶液中，置于太阳模拟器下进行光照，磁力搅拌器恒温搅拌（25 °C，240 r/min）进行动态吸附实验，持续吸至附饱和。不使用搅拌器进行静态吸附平行实验。用以下公式计算出重金属离子饱和吸附量：

$$A = \frac{\rho_0 V_0 - \rho_1 V_1}{m_d} \quad (\text{式 2-25})$$

其中， V_0 和 V_1 分别代表吸附前后溶液的体积（mL）， ρ_0 和 ρ_1 分别表示吸附前后溶液的浓度（mg/mL）， m_d 为干燥后的材料质量（g）。

2.3.4 水蒸发过程中辐射、对流和传导的能量损失评估

采用 Stefan-Boltzmann 定律评估了 PPy@eggplant 气凝胶（PPy@eggplant-0.1）对空气的辐射损失：

$$P_{\text{radt}} = \varepsilon \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (\text{式 2-26})$$

用牛顿冷却定律评估了 PPy@eggplant 气凝胶对空气的对流损失：

$$P_{\text{convt}} = h(T_2 - T_1) \quad (\text{式 2-27})$$

PPy@eggplant 气凝胶对散装水的传导损失如下：

$$P_{\text{cond}} = \frac{Cn\Delta T}{tA} \quad (\text{式 2-28})$$

式中 ε 为样品的发射率（0.13）， σ 为 Stefan-Boltzmann 常数（ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ）， T_2 为 PPy@eggplant-0.1 表面的温度（35.5 °C）， T_1 为 PPy@eggplant-0.1 表面周围产生的蒸汽温度（33.9 °C）， h 为空气对流传热系数（ $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ）， C 为水的比热容（ $4.2 \text{ J/g} \cdot \text{°C}$ ）， n 为水的质量（70 g）， ΔT 为 70 g 水在 3600 s 内升高的温度（0.7 °C）， t 为模拟太阳光光照时间（3600 s）， A 为 70 g 水容器投影面积（ 5.3066 cm^2 ）。

2.3.5 光、暗条件下溶液吸光度的评估

为了验证 PPy@eggplant 气凝胶在处理染料废水时，主要起吸附作用，还是降解作用，分别在太阳光和无光条件下进行光热水蒸发实验，检测处理 30 min 和 60 min 后的 RhB 溶液（初始浓度为 50 mg/L）的吸光度。为了使结果更容易理解，在 30 min 后用溶液稀释至 15 mg/L，60 min 后稀释至 10 mg/L，检测处理后的 RhB 溶液吸光度。

2.4 本章小结

本章成功构建制备了两种茄子基多孔材料——高抗盐茄子碳气凝胶、茄子/聚吡咯复

合气凝胶，并进行了性能表征，其主要结果如下：

（1）通过碱处理、冷冻干燥、碳化工艺制备 EC 气凝胶。通过对原茄子碱处理，优化碳化工艺、材料厚度成功制备 EC 气凝胶。EC 气凝胶具备良好的尺寸稳定性和高抗盐性，能够从高浓度盐水中产生清洁水。

（2）通过碱处理、冷冻干燥和原位聚合成功制备 PPy@eggplant 复合气凝胶。PPy@eggplant 气凝胶具备优异的力学性能和形状回复能力，解决了材料的存储、运输和实际应用问题，能够从重金属离子废水中产生清洁水，并吸附去除重金属离子。

第3章 高抗盐茄子碳气凝胶光热水蒸发性能研究

3.1 引言

随着工业化和城市化的快速发展,淡水资源短缺已成为全世界最紧迫的挑战之一^[78]。针对这一挑战,各种海水淡化脱盐技术被应用于产生清洁水,包括反蒸馏^[79]、多级闪蒸^[80]、多效闪蒸^[81]、蒸汽压缩蒸馏^[82]、电渗析^[83]等,这些技术虽然能够有效的生产清洁水,但是由于其设备复杂、成本昂贵、能源消耗大和环保问题而限制其发展。而太阳能光热水蒸发系统以其优异的光热转换效率、成本效益和零环境危害等优点而备受关注;其水蒸发性能显著提高,通过改善光吸收、减少热损失、优化供水、降低蒸发焓、开发冷蒸发表面等方式,已接近商业可行性^[84];然而,大多数现有研究主要集中在低盐度卤水,不满足工业废水和长期蒸发系统的耐盐要求(10~20 wt.%)。在实际蒸发过程中,蒸发器上和蒸发器内部的盐积累是一个重大的挑战,特别是对于含有高盐度的盐水,因为它会降低蒸发性能,并可能使蒸发器失活^[85],因此有效管理盐沉积对于高效处理高盐度海水至关重要。

近年来,天然生物质材料因其多样化的优势、生物相容性、可降解性越来越受到研究者的关注。值得注意的是,具有天然多孔通道结构的生物质材料可以诱导强大的毛细力,用于快速的水传输和盐水回流^[86-87];利用这些固有特性,由生物质材料构建的各种蒸发器已显示出优异的抗盐能力。例如,Zeng 等人^[88]将榴莲皮废弃物碳化,在宏观尺度上形成了三维金字塔结构,在微观尺度上形成了多孔结构,在 3.5 wt.% 盐水长时间蒸发过程中,有效地诱导了强烈的毛细作用而不产生盐沉淀。同样,Sun 等人^[89]制备了一种具有内部和横向多层结构的三维碳化玉米芯蒸发器,在 1 个太阳光照射下,实现了 $4.16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率,同时有效地缓解了盐沉积问题。这些研究强调了生物质蒸发器结合耐盐特性实现高性能的可行性。然而,针对高盐度条件下蒸发而设计的生物质蒸发器的报道相对较少,在高盐条件下运行的生物质蒸发器的耐盐机理需要进一步研究。

因此,本章在前一章研究中构建茄子碳(Eggplant carbon, EC)气凝胶的基础上,对其性能进行表征,并对光热水蒸发性能、高抗盐性进行研究。主要内容有:(1)探究不同碳化温度、不同厚度对 EC 气凝胶水蒸发速率的影响,以纯水蒸发速率为对照,确定最优碳化温度、材料厚度的 EC 气凝胶。(2)将最优的 EC 气凝胶分别对 3.5%、10%、15%、20%、25 wt.% 的 NaCl 溶液进行蒸发实验,研究分析 EC 气凝对盐水的蒸发速率和抗盐能力。(3)探究其高抗盐性能:快速供水和快速回流性能研究。探究多孔材料从毛细管运动到毛细流动的运动理论方程,建立芯吸高度-时间经验方程。数值模拟研究验证 EC 气凝胶内部的水压力、水传输和盐度分布。(4)基于实验和理论研究结果,明确 EC 气凝胶在高盐度水蒸发过程中的耐盐机理。

3.2 结果与分析

3.2.1 形貌、润湿性分析

图 3-1 为不同碳化温度下的 EC 气凝胶的 SEM 图。如图 3-1b 所示, EC-650 气凝胶具有丰富的相互连通的孔洞, 呈蜂窝状结构, 孔径分布范围为 $0.42 \sim 2.47 \text{ mm}$, 平均孔径 $1.18 \pm 0.40 \text{ mm}$ (图 3-3b), 这些孔洞可以作为水分补充和蒸汽逸出的通道, 增加太阳光在材料内部的反射与吸收, 有利于光热速率的转换^[90]。本章探究了不同碳化温度样品的水蒸发性能, 发现结构更完整的 EC-650 气凝胶的光热水蒸发速率较高, 因此主要以 EC-650 气凝胶为研究对象, 并进行一系列的表征和应用。

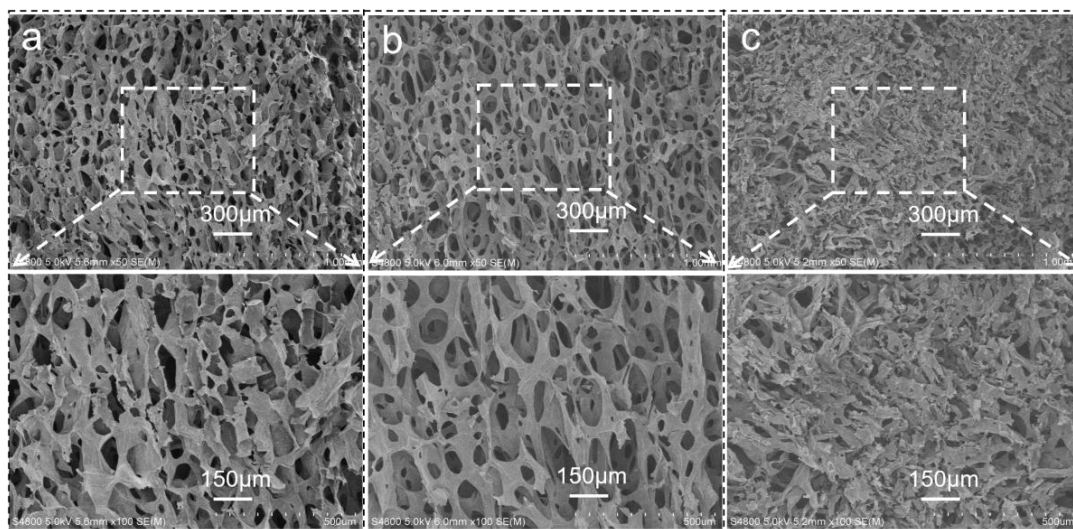


图 3-1 不同碳化温度下的 EC 气凝胶的 SEM 图: a) EC-550; b) EC-650; c) EC-750.

Fig. 3-1 SEM images of EC aerogel at different carbonization temperatures: a) EC-550; b) EC-650; c) EC-750.



图 3-2 EC-650 气凝胶放置在花蕊之上的光学图片.

Fig. 3-2 Optical images of EC-650 aerogel standing on a flower.

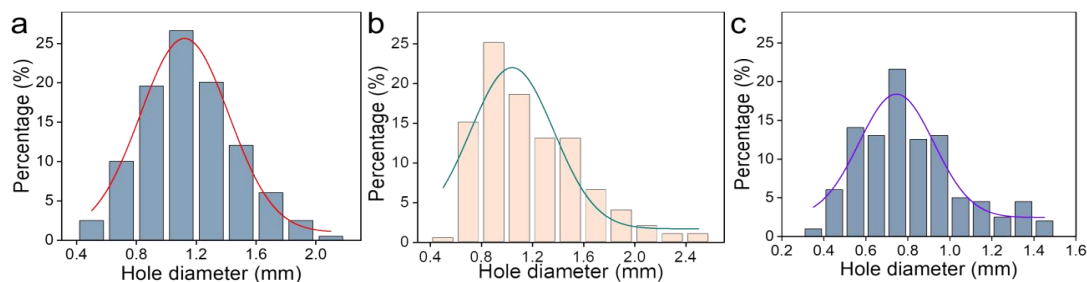


图 3-3 不同碳化温度下 EC 气凝胶孔径分布: a) EC-550; b) EC-650; c) EC-750.

Fig. 3-3 Distribution of pore diameters of EC aerogel with different carbonization temperatures: a) EC-550; b) EC-650; b) EC-750.

由图 3-2 可见, EC-650 气凝胶可以稳定地放置在鲜花的花蕊之上, 说明经过碳化后的气凝胶具有较低的密度和较高的孔隙率, SEM 图像证实了 EC 气凝胶的高度多孔结构 (图 3-1)。此外, 如图 3-4a 所示, 三种 EC 气凝胶的孔隙率均超过 90%, 其中 EC-650 气凝胶的孔隙率最高, 为 97.8%, 结果归因于 EC-550 气凝胶低温碳化不充分, 多孔结构不完整, EC-750 气凝胶高温碳化导致多孔结构坍塌, 孔结构被破坏, 导致相应孔隙率降低 (图 3-1a, c) [91]。相应地, EC-550 气凝胶的平均孔径为 $1.15 \pm 0.31 \text{ nm}$, 孔径分布范围为 $0.50 \sim 2.10 \text{ nm}$ (图 3-3a); 由于碳化温度较高, EC-750 气凝胶发生结构坍塌, 导致平均孔径减小为 $0.81 \pm 0.24 \text{ nm}$, 孔径分布范围为 $0.35 \sim 1.45 \text{ nm}$ (图 3-3c)。孔隙率的差异与气凝胶的吸水量结果一致, 其中 EC-650 气凝胶实现了 $39.76 \pm 0.25 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的吸水量, 超过了 EC-550 气凝胶 ($36.91 \pm 0.38 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 EC-750 气凝胶 ($35.83 \pm 0.12 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) (图 3-4b)。研究发现, EC 气凝胶的吸水量高于前人研究的[92-93], 表明其在水分蒸发过程中具有优异的补水能力。

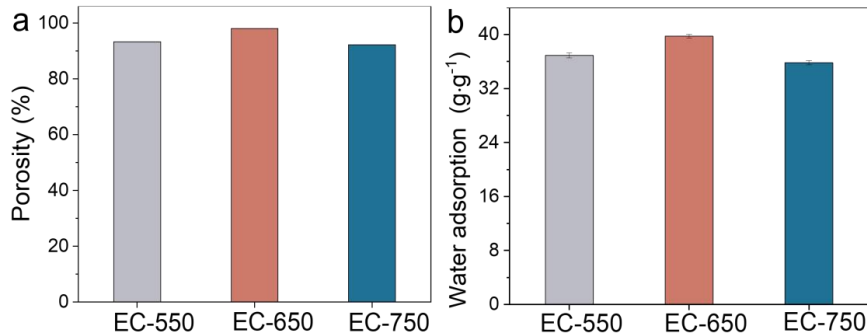


图 3-4 不同碳化温度下 EC 气凝胶的孔隙率和吸水能力: a) 孔隙率; b) 吸水能力.
Fig. 3-4 Porosity and water adsorption capacity of EC aerogels at different carbonization temperatures, respectively: a) porosity; b) water adsorption capacity.

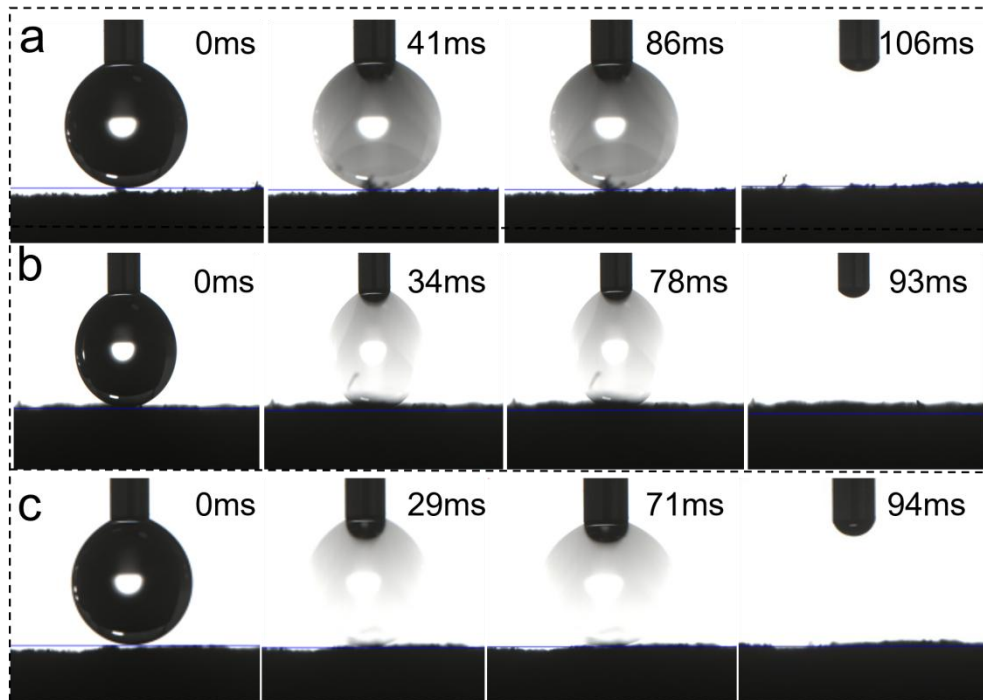


图 3-5 水滴在不同碳化温度下的 EC 气凝胶表面充分扩散: a) EC-550; b) EC-650; c) EC-750.
Fig. 3-5 Water droplets are fully spread on the surface of EC aerogel with various carbonization temperatures: a) EC-550; b) EC-650; c) EC-750.

如图 3-5b 所示, EC-650 水接触角为 0° , 水滴在 93 ms 内完全分散在气凝胶内部, 表明其具有超亲水性, 在蒸发过程中具有快速和优异的补水能力, 其原因是 EC 气凝胶表面粗糙, 丰富的孔结构造成的。此外, EC-550 和 EC-750 气凝胶也表现出超亲水性, 水接触角为 0° , 水滴分别在 106 和 94 ms 内完全铺展在气凝胶内部 (图 3-5a, c)。由此可以推断, 所制备的 EC 气凝胶具有宽光谱吸收范围, 表现出强烈的光吸收, 以及具有高度多孔的蜂窝状结构产生的多重反射和衍射, 结合其出色的供水能力和用于抑制热损失的低热导率 (第 3 章 3.2.4 节进行了讨论), 所制备的 EC 气凝胶能够从各种蒸发介质中通过太阳能蒸发生产清洁水 (图 3-6)。

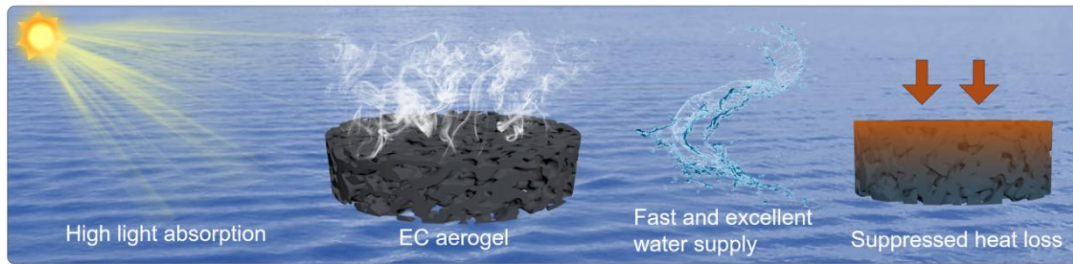


图 3-6 EC 气凝胶的优点.
Fig. 3-6 Merits of the EC aerogel.

3.2.2 结构特征和元素分析

采用 FTIR 和 XRD 分析检测碳化前后的结构差异。如图 3-7a 所示, 茄子气凝胶和 EC 气凝胶在 3378 cm^{-1} (O-H), 2928 cm^{-1} (C-H), 1617 cm^{-1} (C=O) 和 1064 cm^{-1} (-OH) 处显示出纤维素的特征吸收峰; 经过碳化处理后, 3378 , 2928 , 1617 和 1064 cm^{-1} 处的峰减弱或消失, 表明碳化过程中发生了脱水和热解反应^[94-95]; 这些极性键的存在表明 EC 气凝胶具有良好的亲水特性。EC 气凝胶的 XRD 谱图如图 3-7b 所示, 在 $2\theta = 22.4^\circ$ (200 晶面) 处与原始峰相比发生了显著变化, 其中 (200) 晶面的特征峰被锐化并向更高的 2θ 值偏移, 且 EC 气凝胶在 28.3° 附近出现微弱的峰, 在 30.4° 附近出现更明显的尖锐峰, 分别对应于 (101) 和 (100) 晶面的石墨烯结构的特征峰, 表明碳材料的形成^[96]。

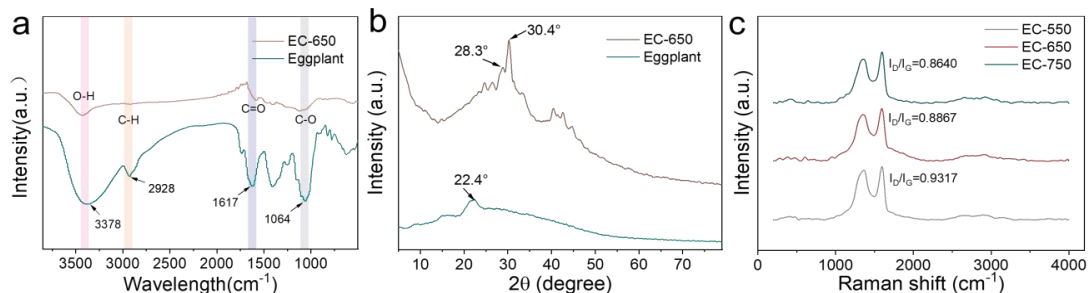


图 3-7 a-c) 分别是茄子和 EC 气凝胶的 FTIR, XRD 和 Raman 光谱.
Fig. 3-7 a-c) FTIR, XRD, and Raman spectra of eggplant and EC aerogel, respectively.

如图 3-7c 所示, 拉曼光谱用于评估 EC 气凝胶的石墨化程度。在 550°C 、 650°C 和 750°C 碳化温度下, EC 气凝胶在 1358 和 1594 cm^{-1} 附近出现两个尖锐峰, 分别对应于碳原子晶格缺陷的 D 峰和 sp^2 杂化引起的碳原子面内伸缩振动的 G 峰^[97], 碳化温度的升高导致了更高的石墨化程度, 表现为 D 和 G 峰强度比值的降低 ($0.9317 \sim 0.8640$)。

图 3-8 显示了茄子气凝胶碳化前后的 XPS 数据。如图 3-8a, b 所示, 茄子气凝胶的 C1s 光谱在 284.8、286.5 和 288.8 eV 处出现峰值, 分别对应于 C-C、C-O-C/C-O-H 和 C=O 基团; 茄子气凝胶的 O1s 峰位于 532.92 和 531.42 eV, 分别与 C-O 和 C=O 基团相关^[65,98]。EC 气凝胶的 C1s 谱中, C-C 峰变得尖锐, C=O 峰消失, C-O-C/C-O-H 峰减弱, 此外, EC 气凝胶的 O1s 谱图中, C=O 峰消失, 这些减弱和消失的峰表明碳化过程中发生了脱氧脱氢和热解反应, 导致其他元素的减少和 C 元素的增加^[99,100]。图 3-9a 显示, XPS 光谱图证明了 C 元素的增加, 表明碳化后 C 元素的信号显著增加。XPS 元素百分比进一步证实了这一结果, 如图 3-9b 所示, 茄子气凝胶的元素含量由 49.7 wt.% 的 C 和 43.69 wt.% 的 O 组成, 碳化处理后, EC 气凝胶中的 C 元素增加到 81.77 wt.%, 而 O 元素减少到 12.22 wt.%, 证明了热解后碳材料的形成。由图 3-8c 可知, EDS mapping 图片显示 C、O、K、Na 和 Ca 元素均匀分布在整個 EC 气凝胶中, 这些元素的存在有助于其亲水性, 从而增强蒸发过程中供水能力。

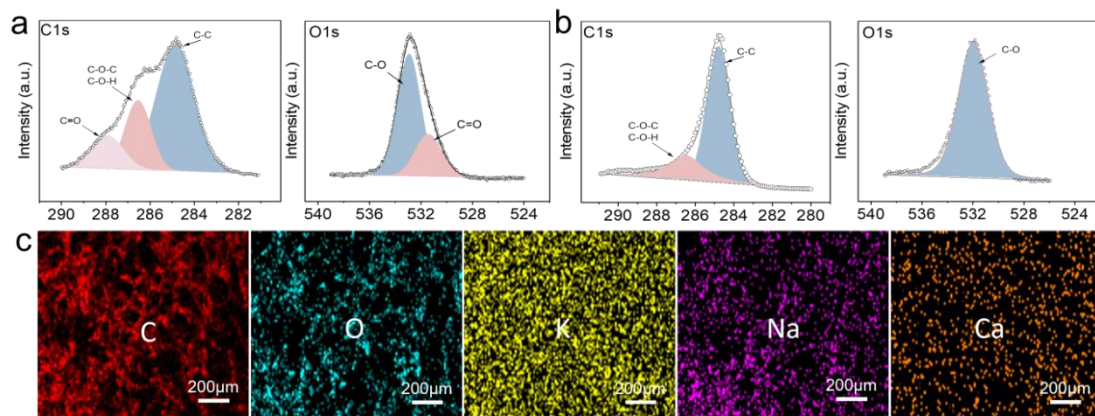


图 3-8 a) 茄子气凝胶的 C1s 和 O1s 峰; b) EC 气凝胶的 C1s 和 O1s 峰; c) EC 气凝胶表面 C、O、K、Na 和 Ca 元素的 EDS 图谱。

Fig. 3-8 a) C1s and O1s spectra of eggplant aerogel; b) C1s and O1s spectra of EC aerogel; and c) EDS mapping pictures of C, O, K, Na, and Ca elements on EC surface.

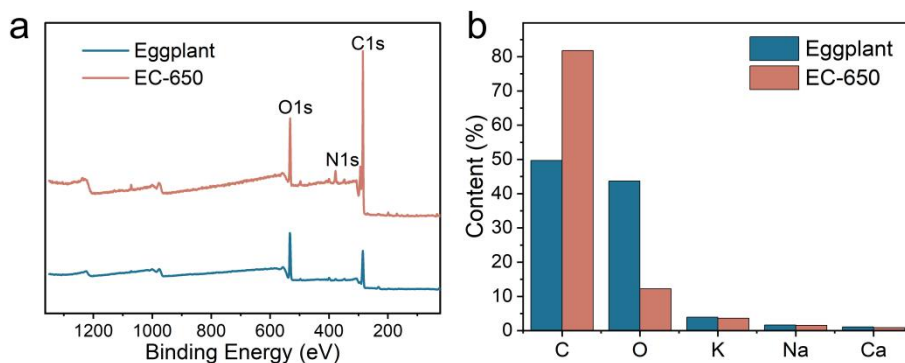


图 3-9 a) 茄子和 EC-650 的 XPS 光谱; b) 茄子和 EC-650 的元素含量。

Fig.3-9 a) XPS spectra of eggplant and EC-650, respectively; b) Elemental content of eggplant and EC-650, respectively.

3.2.3 材料力学性能分析

材料的力学特性对其在实际应用过程中的长期稳定性、操作、储存和运输等方面有着巨大的影响。如图 3-10a 所示, 经过碳化处理后, EC 气凝胶的压缩应力为 159.22 kPa, 是茄子气凝胶 (4.43 kPa) 的 35.94 倍, 材料的压缩应力显著提高。由图 3-11 可知, EC

气凝胶在 300 g 的压力下压缩 24 h 后仍能保持其尺寸，进一步证明了其良好的尺寸稳定性。

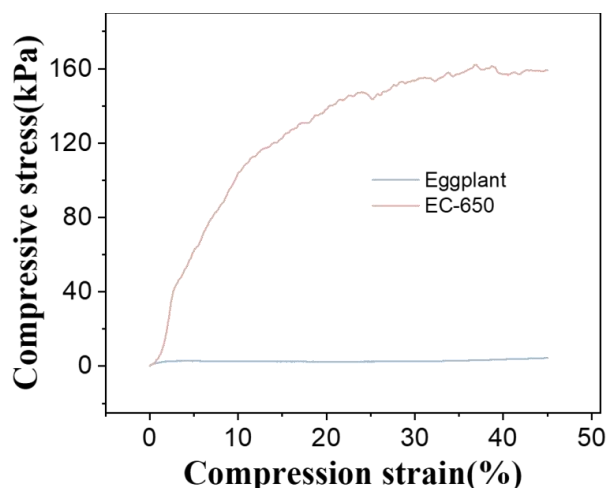


图 3-10 茄子和 EC 气凝胶的压缩性能。

Fig. 3-10 Compression characteristics of eggplant and EC aerogel.



图 3-11 EC 气凝胶被 300 g 重物压缩 24 h 前后的光学图片。

Fig. 3-11 Images of the EC aerogel before and after it was compressed by a 300 g weight for 24 h.

3.2.4 吸光度，导热系数分析

材料的光吸收强度对蒸发性能至关重要。EC-650 气凝胶在太阳光谱 (250~2500 nm) 的总吸收如图 3-12a 所示，计算其太阳总吸收率为 97.26%，表明其具有优异的光吸收能力，超高的光吸收能力可归因于碳材料固有的高光吸收能力以及 EC 气凝胶多孔结构内部发生的大量光衍射和散射现象 (图 3-12b) [101]。

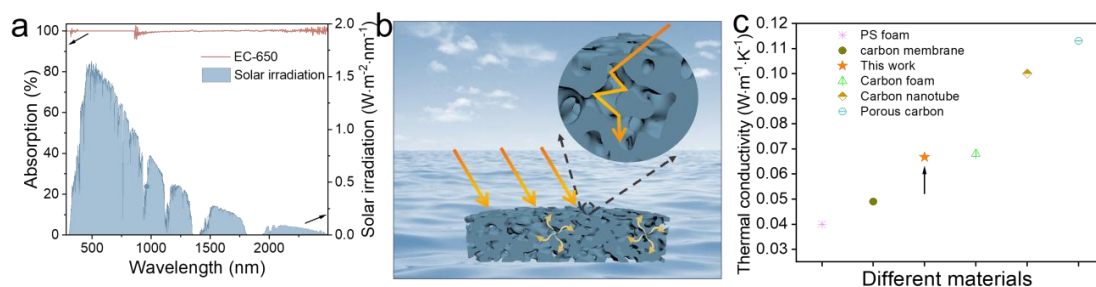


图 3-12 a) EC-650 气凝胶的总吸光率; b) EC 气凝胶内部光衍射和散射示意图; c) EC-650 气凝胶的热导率与其他报道的热导率的比较。

Fig. 3-12 a) Total light absorbance of the EC-650 aerogel; b) schematic illustration of the EC aerogel's internal light diffraction and scattering; c) comparison of the thermal conductivity of the EC-650 aerogel with other reported materials.

由图 3-13a, b 所示, EC-550 和 EC-750 气凝胶也表现出优异的光吸收能力, 分别为 96.95% 和 97.32%。除了太阳光吸收强度, 有效的热管理也是蒸发性能的重要决定因素。

如图 3-12c 所示, EC-650 气凝胶具有 $0.067 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的低热导率, 低于先前合成的碳纳米管 ($0.100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)^[102]、多孔碳 ($0.113 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)^[103] 和泡沫碳 ($0.068 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)^[104], 并与碳膜 ($0.049 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)^[105] 和聚苯乙烯泡沫 ($0.040 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)^[106] 相当, 证明了 EC 气凝胶优异的隔热能力, 低的导热系数可以防止热量损失, 并将含有的热能集中在高度多孔结构中, 从而增强 EC 气凝胶蒸发器在产生清洁水方面的性能。

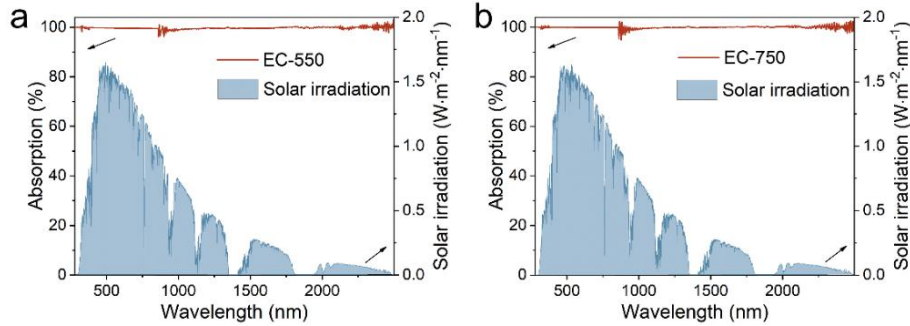


图 3-13 不同碳化温度下 EC 气凝胶的总吸光率: a) EC-550; b) EC-750.

Fig. 3-13 Total light absorbance of EC aerogel for different carbonization temperatures: a) EC-550; b) EC-750.

3.3 EC 气凝胶光热转换性能

3.3.1 碳化温度对光热水蒸发性能的影响

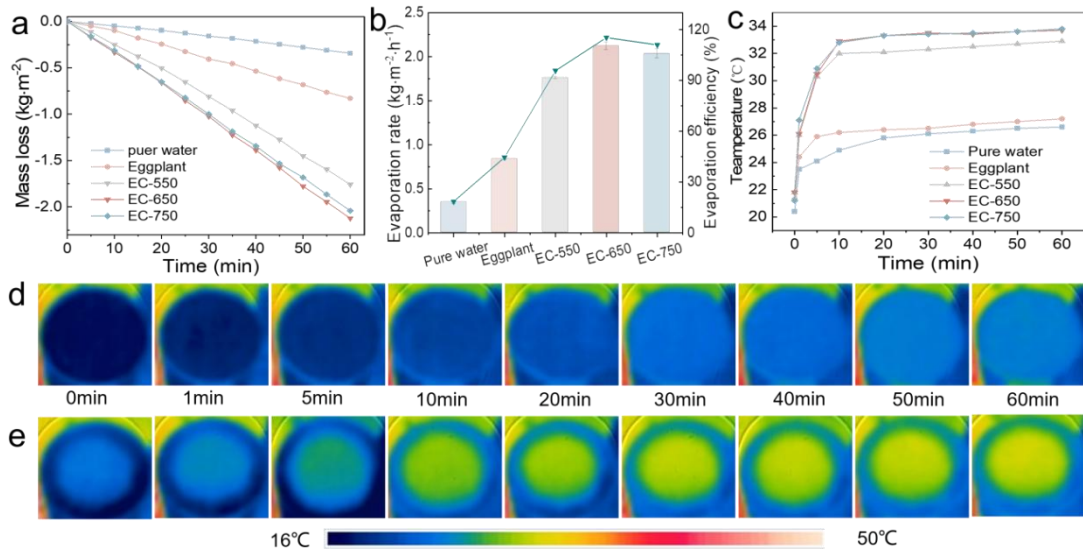


图 3-14 EC 气凝胶的纯水蒸发性能: a) 纯水、茄子气凝胶和 EC 气凝胶的水质量损失; b) 纯水、茄子气凝胶和 EC 气凝胶的蒸发速率和蒸发效率; c) 蒸发过程中纯水、茄子气凝胶和 EC 气凝胶的表面温度变化; d & e) 蒸发过程中纯水和 EC-650 气凝胶的红外热像图。

Fig. 3-14 Pure water evaporation performance of EC aerogel: a) water mass losses of pure water, eggplant aerogel, and EC aerogel; b) evaporation rates and efficiencies of pure water, eggplant aerogel, and EC aerogel; c) surface temperature changes of pure water, eggplant aerogel, and EC aerogel during evaporation; and d & e) infrared thermal pictures of pure water and EC-650 aerogel during evaporation.

通过考察 EC 气凝胶对纯水的蒸发情况, 优化碳化温度。如图 3-14a 所示, 纯水和茄子气凝胶 1 h 后的水质量损失分别为 0.34 和 $0.82 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 相比之下, EC-550 气凝胶水质量损失显著增加至 $1.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 说明碳化后的 EC 气凝胶具有优异的蒸发性能。随着碳化温度的升高, EC-650 气凝胶的水质量损失进一步增加至 $2.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 而 EC-750 气凝胶的水质量损失略有下降, 为 $2.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。相应地, 纯水、茄子气凝胶和 EC-550、EC-650、EC-750 气凝胶的蒸发速率分别为 0.34 、 0.82 、 1.76 、 2.12 和 $2.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图

3-14b)。值得注意的是, EC-650 气凝胶的蒸发效率最高, 达到 115.30%, 超过 EC-550 和 EC-750 气凝胶, 是茄子气凝胶的 2.53 倍, 是纯水蒸发的 6.12 倍。通过蒸发过程中的温度变化对结果进行佐证, 如图 3-14c 所示, 纯水和茄子气凝胶的平衡温度分别为 26.6 和 27.2 °C, 特别地, EC-550、EC-650 和 EC-750 的平衡温度分别达到了 32.9 °C、33.7 °C 和 33.8 °C。

红外热像图进一步验证了这些结果, 表明纯水和茄子气凝胶中的颜色变化可以忽略不计, 这表明其光热转换能力较差(图 3-14d 和图 3-15), 经过碳化后, EC-550、EC-650 和 EC-750 气凝胶的蓝色逐渐变为黄色, 说明其优异的光热转换能力(图 3-14e 和图 3-15)。在蒸发过程中, 光吸收、孔隙率、吸水量等因素协同影响蒸发性能, 由此可以推断, EC-650 气凝胶达到了这些因素的最佳平衡, 从而具有较优的蒸发速率, 因此, 选择 650 °C 碳化的 EC 气凝胶, 进一步优化 EC 气凝胶的厚度。

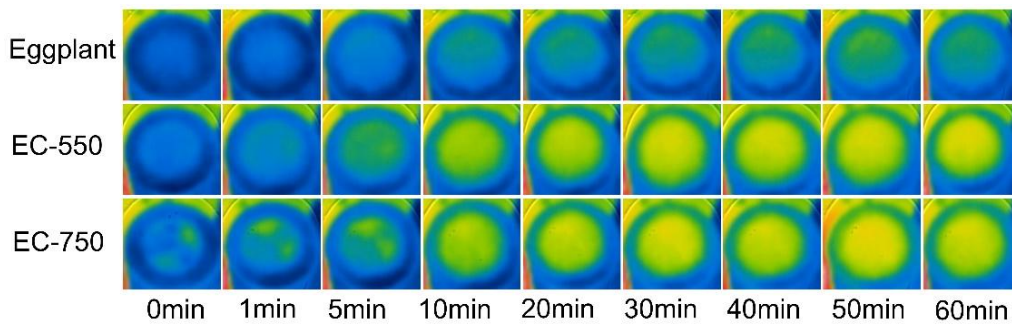


Fig. 3-15 茄子气凝胶、EC-550 和 EC-750 在水分蒸发过程中的红外热图像。

Fig. 3-15 Infrared thermal images of eggplant aerogel, EC-550 and EC-750 during water evaporation.

3.3.2 材料厚度对光热水蒸发性能的影响

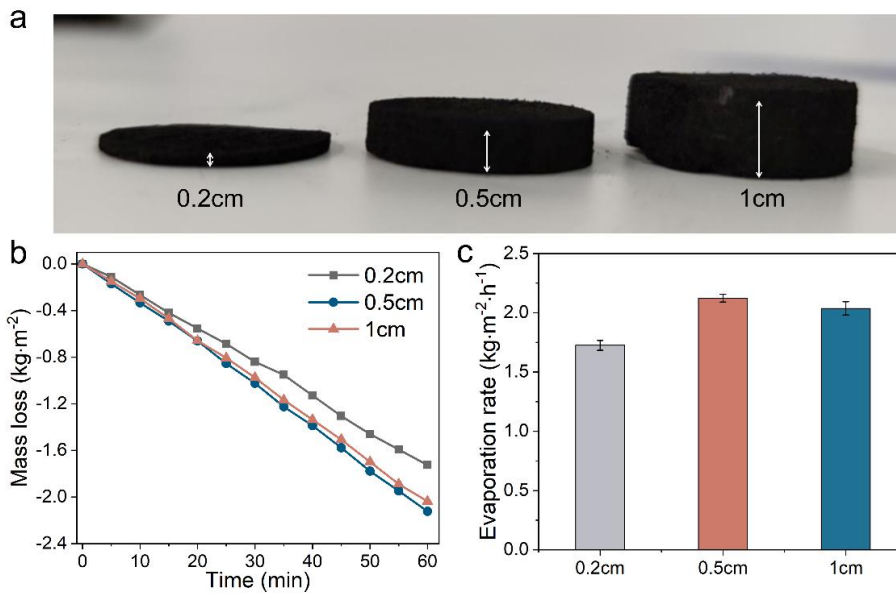


Fig. 3-16 茄子气凝胶、EC-550 和 EC-750 在水分蒸发过程中的红外热图像。

Fig. 3-16 Infrared thermal images of eggplant aerogel, EC-550 and EC-750 during water evaporation.

如图 3-16a 所示, EC 气凝胶在高度为 2, 5 和 10 mm 时的水质量损失分别为 1.73, 2.12 和 2.03 kg·m⁻² (图 3-16b), 相应地, 这三种 EC 气凝胶分别实现了 1.73、2.12 和 2.03 kg·m⁻²·h⁻¹ 的不同蒸发速率(图 3-16c), 2 mm 气凝胶相对较小的蒸发面积和 10 mm 气凝胶水分补给不足导致了较低的蒸发速率, 因此, 在碳化温度为 650 °C、厚度为 5 mm

条件下制备的 EC 气凝胶被确定为优化的 EC 气凝胶。同时，对气凝胶中水蒸发过程中的蒸发焓进行了测量和讨论，确定了 EC-650 气凝胶的蒸发速率；记录数据如表 3-1 所示，根据计算结果，纯水和 EC 气凝胶的平均蒸发速率比为 0.8679，因此，计算出的 EC 气凝胶内水的蒸发焓为 $1958.0 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ，低于水的蒸发焓 ($2256.0 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$)。

表 3-1 纯水和 EC 气凝胶蒸发速率的比较.

Table 3-1 Comparison of evaporation rates of pure water and EC aerogel.

Test	Evaporation Rate of Pure Water ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	Evaporation Rate of Aerogel ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	Evaporation Rate Ratio (Water/Aerogel)
1	22.14	25.59	0.8652
2	20.52	23.34	0.8792
3	21.54	25.90	0.8317
4	26.52	30.70	0.8638
5	30.15	33.52	0.8995
Average			0.8679

3.3.3 盐浓度对光热蒸发性能的影响

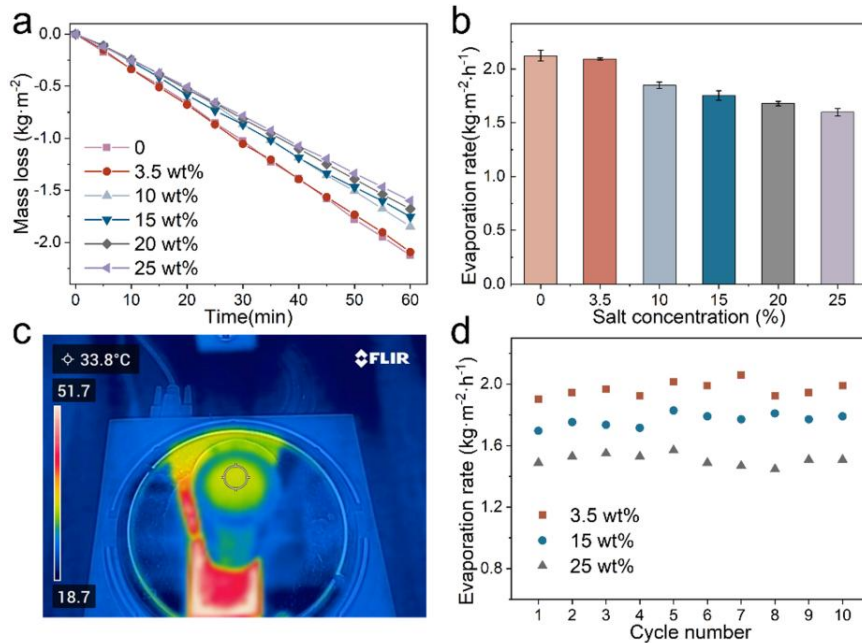


图 3-17 EC 气凝胶蒸发盐水的性能: a & b) 分别为不同浓度盐水的质量损失和蒸发速率; c) EC 气凝胶在湿润状态下 1 h 后的红外热图像; d) 连续蒸发 3.5、15 和 25wt.% 的盐水的连续蒸发.

Fig. 3-17 Performance of EC aerogel in evaporating saline water: a & b) mass losses and evaporation rates at different concentrations of saline water, respectively; c) infrared thermal images of the EC aerogel after 1 h in a wet state; d) continuous evaporation of 3.5, 15, and 25 wt.% saline water.

采用不同浓度的 NaCl 水溶液 (0、3.5、10、15 和 25 wt.%) 进行模拟海水蒸发试验，以评估 EC 气凝胶的盐水蒸发性能。如图 3-17a 所示，0 和 3.5 wt.% 盐水的水质量损失接近，表明低浓度海水对蒸发性能没有显著影响，10、15、20 和 25 wt.% 盐水蒸发 1 h 后的质量损失分别为 1.84 、 1.75 、 1.68 和 $1.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ，相应地，0、3.5、10、15、20 和 25 wt.% 盐水的蒸发速率分别为 2.12 、 2.09 、 1.84 、 1.75 、 1.68 和 $1.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 3-17b)。值得注意的是，在蒸发 3.5 wt.% 盐水时，EC 气凝胶的太阳能蒸发速率达到了 $2.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，对应的能量效率为 113.7%；即使蒸发 25 wt.% 的高盐度水时，EC 气凝胶也实现了高达 $1.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的太阳能蒸发速率，超过了许多先前报道的结果 (表 3-2)，

例如选择性太阳能吸收器/黑体发射器 (25 wt.% NaCl 浓度, $0.49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [107], 表面碳化双峰多孔木膜 (15 wt.% NaCl 浓度, $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [108], Janus 木质蒸发器 (20 wt.% NaCl 浓度, $1.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [109], 丙烯酸酯树脂/碳纳米纤维膜 (20wt.% NaCl 浓度, $1.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [110], 碳化冬瓜 (20 wt.% NaCl 浓度, $1.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [111], 氧化石墨烯 (GO) 改性的树根蒸发器 (21 wt.% NaCl 浓度, $1.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [112]和其他蒸发器[113-119]。

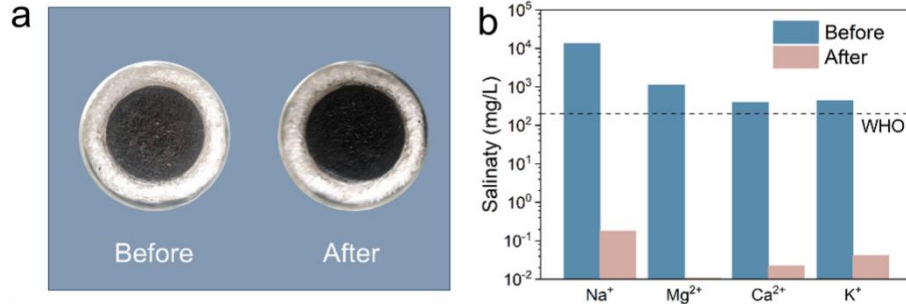


图 3-18 a) EC 气凝胶连续蒸发 25 wt.% 的盐水前后的光学图像; b) 蒸发水和模拟海水中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 的浓度。

Fig. 3-18 a) Optical images of the EC aerogel before and after the continuous evaporation of 25 wt.% saline water; b) concentrations of Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , and K^+ in the evaporated water and the simulated seawater.

表 3-2 蒸发性能与之前涉及高盐度水的研究进行比较。

Table 3-2 Comparison of evaporation performance with previous studies involving high-salinity water.

Materials	NaCl Concentration (wt.%)	Evaporation Rate ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	Reference
Selective solarabsorber/blackbody emitter	25	0.49	[107]
Surface-carbonized bimodal porous wood membrane	15	0.80	[108]
Janus Wood Evaporator	20	1.20	[109]
Acrylic ester resin/carbon nanofibers	20	1.60	[110]
Carbonized white gourd	20	1.44	[111]
GO decorated tree-root based solar evaporator	21	1.6	[112]
Micro-macrocavities fabric-based evaporator	10	1.4	[113]
Conventional Zn-based MOFs with copper on commercial carbon cloth	10	1.63	[114]
MXene/PPy modified asymmetry sponge	10	1.691	[115]
Acovalently doped PANI -based photothermal fabric	10	1.49	[116]
Janus nanofibrous aerogels	20	6.87 (6 Sun)	[117]
Arbonized enteromorpha prolifera	Yellow seawater	1.85	[118]
Cu_2SnSe_3 hierarchical nanosphere arrays	Bohai seawater	1.67	[119]
EC aerogel	10/15/20/25	1.84/1.75/ 1.68/1.60	This work

由图 3-17c 可知, 红外热成像显示, 热能被局域在 EC 气凝胶内部, 进一步证明了 EC 气凝胶在蒸发过程中的热损失减少和良好的性能。由图 3-17d 可知, 使用 3.5, 15 和 25 wt.% 的盐水进行连续蒸发实验, 测试 EC 气凝胶的蒸发稳定性, 结果表明, EC 气凝

胶在连续蒸发超过 600 min 后, 蒸发速率没有明显下降, 证明其具有超高的耐盐性, 可用于高盐度水的稳定连续蒸发; 图 3-18a 进一步说明了 EC 气凝胶的耐盐性, 在 25 wt.% 的盐水中蒸发 10 h 后, 其表面没有观察到盐; 这些结果证实了 EC 气凝胶的高耐盐性。如图 3-18b, 分析了蒸发水中阳离子的浓度, 并与 WHO 标准进行了比较, 蒸发水中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 的含量均低于 WHO 标准, 表明 EC 气凝胶可以从海水中产生高质量的清洁水。

3.3.4 EC 气凝胶快速水传输性能研究

本部分探究了 EC 气凝胶快速补水的能力。如图 3-19a 所示, EC 气凝胶达到 60 mm 高度所需时间为 8.0 s, 分别比图 3-20a 和 3-20b 中 EC-550 气凝胶的 9.3 s 和 EC-750 气凝胶的 10.2 s 短, 这一数据强调了 EC 气凝胶的快速水传导, 其具有优异的水传输能力。值得注意的是, EC 气凝胶表现出很强的毛细管速率, 在 1 s 内实现了 21 mm/s 的水传输速率, 在 5 s 内实现了 7.5 mm/s 的水传输速率。

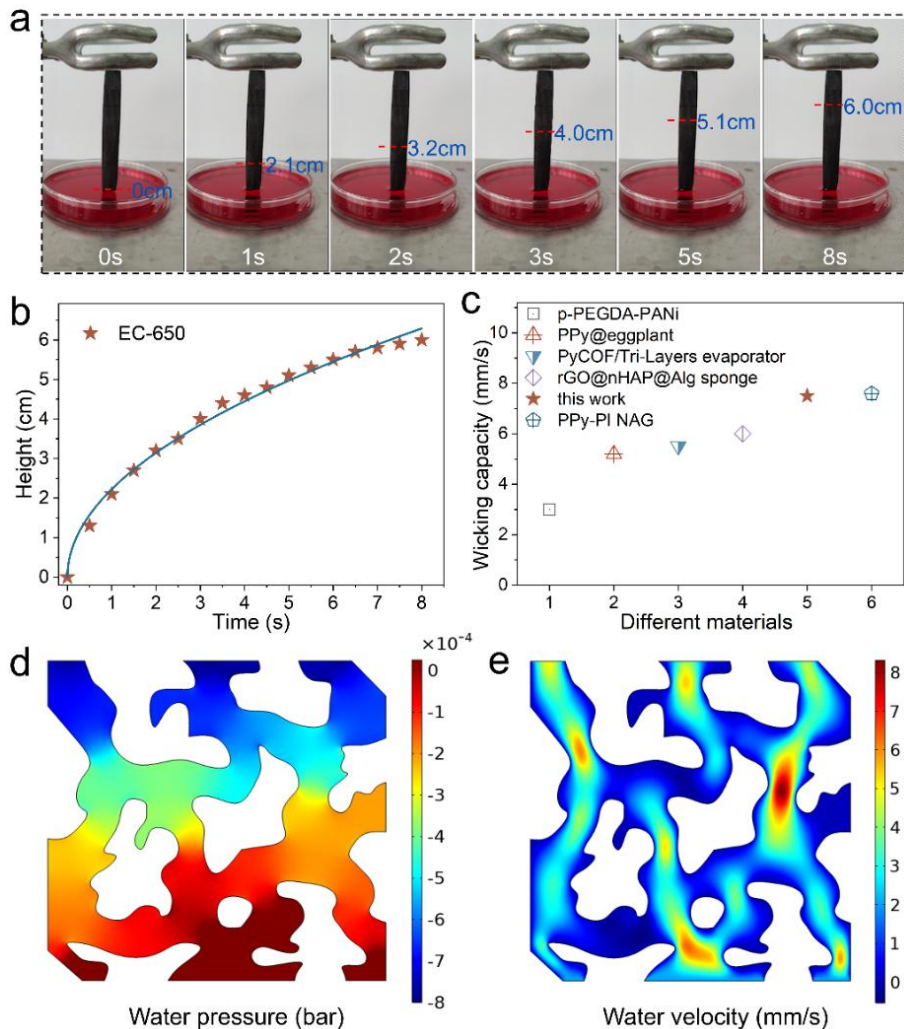


图 3-19 EC 气凝胶的快速水传导: a) EC 气凝胶的水传导动态图像; b) EC 气凝胶的实验和计算高度与时间的关系曲线; c) 不同材料在 5 s 内的吸水能力比较; d & e) 分别为 EC 气凝胶的相对水压和水传输速度的稳态模拟。

Fig. 3-19 Rapid hydraulic conduction of EC aerogel: a) dynamic images of the water conduction of the EC aerogel; b) experimental and calculated height vs. time curves for EC aerogel; c) comparison of the wicking capacity of different materials within 5 s; and d & e) steady-state simulations of the relative water pressure and water transport velocity of the EC aerogel, respectively.

采用最小二乘法将实验数据与数学方程进行拟合；与管状介质中的芯吸动力学不同，多孔介质中的芯吸动力学尚未得到广泛研究；在多孔介质中，相互连通的孔隙通道形成复杂的拓扑结构和几何形状，导致与毛细管效应相关的显著动力学行为；多孔介质的孔径、形状和分布十分复杂，与形状简单、管壁完全封闭的毛细管不同，多孔介质中的毛细管力不能简单地从平均孔径来计算，因此定义了一个有效孔径 R_{eff} 来描述毛细管力。经过推导，得到高度-时间关系方程如下：

$$h = \sqrt{\frac{4\sigma\cos\theta \cdot K}{\mu\phi R_{eff}}} \cdot t \quad (\text{式 3-1})$$

其中 h 为芯吸高度， σ 为空气-水表面张力 ($0.072 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$)， θ 为水接触角， K 为多孔材料的渗透率， μ 为水的粘度 ($2.98 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)， ϕ 为孔隙度， R_{eff} 为平均孔径， t 为芯吸时间。

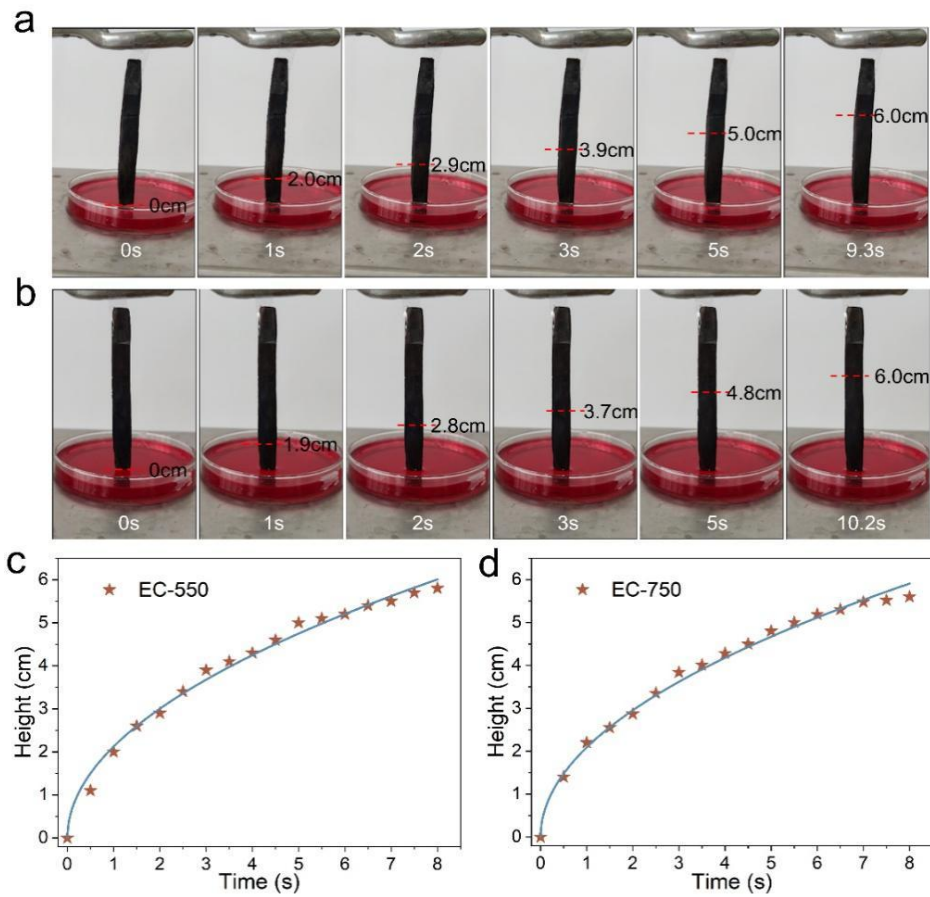


图 3-20 EC 气凝胶随时间变化的流体高度图像和拟合结果: a) EC-550 的流体高度图像; b) EC-750 的流体高度图像; c) EC-550 的拟合结果; d) EC-750 的拟合结果.

Fig. 3-20 Fluid height images and fitting results of EC aerogel with time changes: a) fluid height images of EC-550; b) fluid height images of EC-750; c) fitting results of EC-550; d) fitting results of EC-750.

如图 3-19b、图 3-20c 和图 3-20d 所示，通过使用方程式 3-1 拟合高度-时间的经验方程，拟合结果与实验结果具有良好的一致性。结果表明，所开发的 EC 气凝胶在其高度毫米级的孔隙结构中表现出快速的水分传输。EC 气凝胶的毛细管速率超过了大多数先前报道的结果（图 3-19c），如聚（乙二醇）二丙烯酸酯和聚苯胺的双网络水凝胶（p-PEGDA-PANi, $\sim 3 \text{ mm/s}$ ）^[120]，聚吡咯（PPy）改性的天然茄子气凝胶（PPy@eggplant，

~5.2 mm/s)^[98], 分级纤维膜(三层)和 PPy 修饰的 TpPa-COF 光热材料复合蒸发器(PyCOF/tri-layers evaporator, ~5.5 mm/s)^[121], 还原氧化石墨烯(rGO)、纳米羟基磷灰石(n-HAP)和海藻酸钠(Alg)复合纤维素海绵(rGO@nHAP@Alg sponge, ~6.0 mm/s)^[122]和 PPy 修饰的聚酰亚胺纳米纤维气凝胶(PPy-PI NAG, ~7.6 mm/s)^[123]。

为了进一步阐明优异的毛细能力在实现稳定和高性能的高盐度太阳能海水淡化中的关键作用,对 EC 气凝胶的相对水压力和水传输速度进行了数值模拟,如图 3-19d 所示,在蒸发器顶部产生了负的水压力,保证了水向蒸发表面的连续传输,这一发现与实验结果和随后的数值模拟结果一致。从图 3-18e 可以看出,EC 气凝胶中的水可以以 7.2 mm/s 的平均速度通过蒸发器顶部,这与实验结果非常吻合。EC 气凝胶优越的快速供水能力,在防止盐颗粒析出的同时,有利于充足的水分补充^[124]。

3.3.5 EC 气凝胶快速回流性能研究

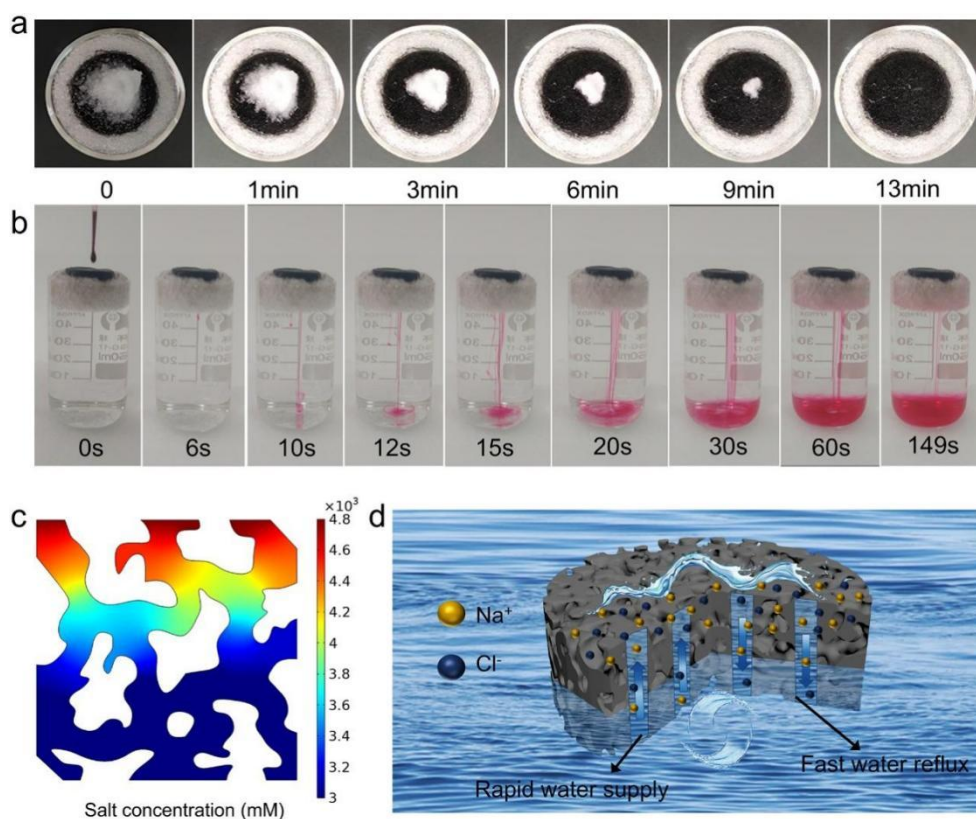


图 3-21 盐水在 EC 气凝胶中的回流性能: a) EC 气凝胶表面盐颗粒的动态溶解; b) EC 气凝胶内部染色盐颗粒的动态回流图像; c) EC 气凝胶中盐度分布的数值模拟; d) EC 的抗盐机制。

Fig. 3-21 Backflow behavior of saline water in EC aerogel: a) dynamic dissolution of salt particles on the EC surface; b) dynamic backflow images of dyed salt particles inside the EC aerogel; c) numerical simulation illustrating the salinity distribution of the EC aerogel; and d) the salt-resistant mechanism of the EC aerogel.

为了进一步验证 EC 气凝胶的耐盐性能,将 1g NaCl 置于盛有 3.5 wt.% 盐水烧杯的 EC 气凝胶表面。如图 3-21a 所示,EC 表面的盐颗粒在 13 min 内完全溶解,证实了 EC 气凝胶的快速导水和优异的补水能力。水传输实验结果(图 3-19a)和数值模拟结果(图 3-19e)表明,EC 气凝胶的快速盐溶解可归因于其超亲水性、毫米级多孔结构和稳定的毛细管能力所诱导的更快的水传输性能。此外,还考察了 EC 气凝胶对高浓度盐水的快速回流性能,如图 3-21b 所示,随着时间的推移,过饱和的红色卤水在垂直方向上发生

回流，没有向两侧扩散，清楚地证明了 EC 气凝胶内部卤水的快速回流特性；此外，烧杯底部的水在 20 s 后变为鲜红色，60 s 后变为暗红色；值得注意的是，回流线在 149 s 时几乎消失，进一步证明了 EC 气凝胶的快速毛细管能力和快速回流特性。通过模拟盐水质量扩散，研究了 EC 气凝胶微结构内部盐离子的对流和扩散。由图 3-21c 可知，数值模拟表明，EC 气凝胶上的盐浓度低于结晶浓度（5400 mM NaCl 溶液），通过促进盐离子向本体水中的快速扩散和转移，实现了超高的抗盐性^[125]。

3.3.6 EC 气凝胶高抗盐性机理分析

由图 3-21d 可知，EC 气凝胶优异的耐盐性能可归因于以下因素：（1）强烈的毛细作用导致快速而优异的水分供应，不仅满足了蒸发需求，而且由于及时的水分补充，使 EC 气凝胶表面和内部的盐浓度保持在较低水平；（2）EC 气凝胶的快速水回流能力可以及时将靠近 EC 表面的浓盐溶液回流至体相水；（3）优异的饱和水含量导致了高的扩散效率、相互连接的毫米级孔洞缩短了离子传输路径，进一步加强了水的供应和水的回流特性。因此，EC 气凝胶内部形成了快速补水和快速水回流的循环，使 EC 气凝胶内部的盐浓度保持在较低的浓度，防止了盐的析出，表现出优异的高盐水抗盐能力。

3.3.7 EC 气凝胶户外测试性能研究

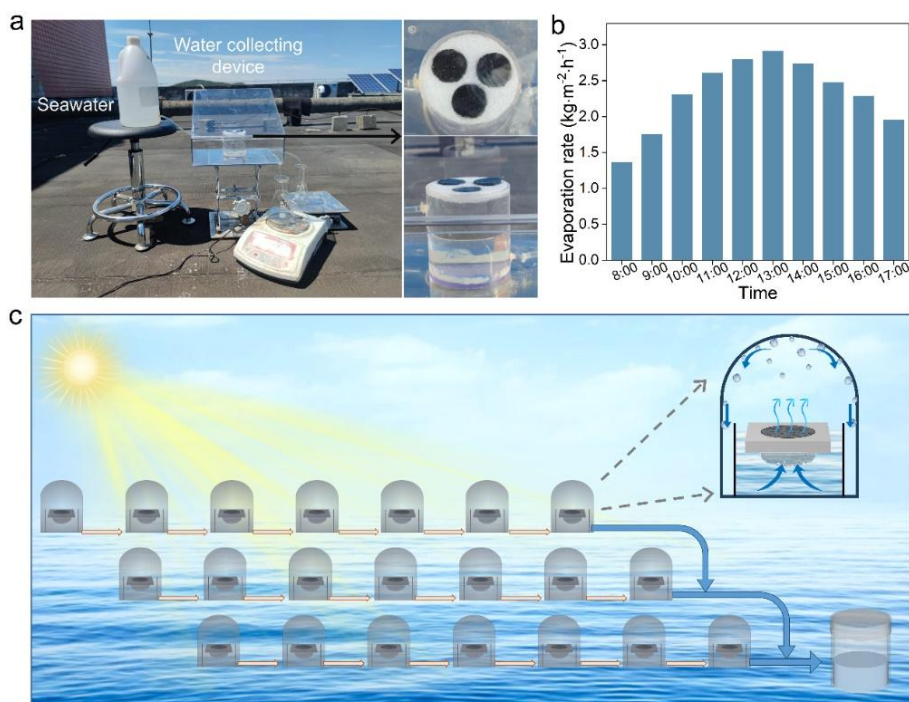


图 3-22 EC 气凝胶 10 h 室外测试: a) 自制太阳能蒸发装置的光学图像; b) 上午 7:00 至下午 5:00 的蒸发率; c) EC 气凝胶实际应用示意图。

Fig. 3-22 Ten-hour outdoor testing of EC aerogel: a) optical image of a homemade solar evaporation device; b) evaporation rates conducted from 7:00 a.m. to 5:00 p.m.; and c) schematic diagram of the EC aerogel in practical implementation.

考虑到冷凝液是太阳能蒸发系统的最终目的，采用自制的冷凝液收集装置，从模拟海水（2024 年 7 月 4 日，中国芜湖）中考察了 EC 气凝胶的淡水产率（图 3-22a）。自制的太阳能蒸发装置包括海水存储单元（20 wt.% 的高浓度海水）和带有电子天平的冷凝液收集系统，平均每小时记录一次质量损失。底部海水设计为循环流动，避免了拆解装置补充海水，并模拟了自然海水的内部对流。如图 3-22b 所示，EC 气凝胶在下午 1:00

实现了 $2.92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率, 表明在实际应用中具有优异的蒸发性能。在 10 h 的测试时间内, 共产生了 $12.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的淡水, 表明 EC 气凝胶具有出色的生产纯水的潜力。基于高的太阳能吸收能力, 快速的供水和回流特性, 以及用于抑制热损失的低热导率, EC 气凝胶在从高盐水生成清洁水方面表现出高蒸发速率和长期稳定性。鉴于这些优点, EC 气凝胶可以模块化进行大规模组装, 旨在从高盐废水和高盐海水中生产清洁水(图 3-22c)。

3.4 本章小结

本章中, 对 EC 气凝胶进行了的光热转换性能及海水淡化性能研究, 具体研究结果如下:

(1) 对不同碳化温度 EC-550、EC-650、EC-750 气凝胶的水蒸发效果研究, 以纯水和茄子气凝胶蒸发速率为对照, 确定了 EC-650 为最优光热材料。

(2) 以不同厚度(2, 5, 10 mm)的 EC-650 气凝胶, 探究水蒸发效果。结果表明 2 mm 气凝胶造成大量热损失, 和 10 mm 气凝胶水分补给不足导致了较低的蒸发速率, 因此, 选择厚度为 5 mm 条件下制备的 EC 气凝胶为最优光热材料。

(3) 研究了不同浓度的 NaCl 水溶液(0、3.5、10、15 和 25 wt.%)模拟海水蒸发实验, 其盐水的蒸发速率分别为 2.12、2.09、1.84、1.75、1.68 和 $1.60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 并进一步探究了 EC 气凝胶的高抗盐性及循环性, 结果表明其具有优异的耐盐性能。

(4) 芯吸实验、理论方程和数值模拟探究了 EC 气凝胶快速水传输性能和快速回流性能。EC 气凝胶表现出很强的毛细管速率, 在 1 s 内实现了 21 mm/s 的水传输速率, 在 5 s 内实现了 7.5 mm/s 的水传输速率, 表明 EC 气凝胶具有快速导水和回流特性。

(5) 分析阐明了 EC 气凝胶的高抗盐机理。优异的水分补充和快速回流, 强大的吸水能力, 相互连接的孔洞结构缩短了离子传输的路径, 导致 EC 气凝胶表面及内部盐浓度低于饱和盐水浓度, 实现了高耐盐性。

(6) 对 EC 气凝胶进行了 10 h 的户外盐水(20 wt.%)蒸发测试, 共产生了 $12.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的淡水, 表明 EC 气凝胶具有出色的生产清洁水的潜力。

第4章 茄子/聚吡咯复合气凝胶光热水蒸发协同重金属离子吸附性能研究

4.1 引言

在第三章中,通过碳化工工艺制备的气凝胶,材料的力学性能变差,受到外力容易破碎,没有形状回复能力,且制备过程是高能耗的,不易于存储、运输和实际应用^[126-127]。因此,制备高性能,具有良好的力学性能、优异的形状回复能力,且成本低,长期稳定生产清洁水的蒸发器是迫切的。

目前,太阳能界面蒸发主要集中于清洁水的生产,忽略了蒸发介质的特性。在以往报道中,由盐水生产清洁水的报道居多,蒸发染料废水生产清洁水也得到了深入的研究^[128-129]。除了盐水和染料废水外,清洁水可以从其他蒸发介质中产生,如油性水,酸或碱废水、重金属离子废水。虽然太阳能界面蒸发可以产生清洁水,但是蒸发介质中的有害物质通常是不可能的移除。因此,在收集清洁水的同时去除蒸发介质中的有害物质,对于更好地处理废水具有重要意义。PPy 是常用的导电聚合物之一,具有易合成、良好的生物相容性和离子交换特性,由于其电子亲和性、离子交换能力和大的多孔分子结构,可用于重金属离子的吸附^[14,71]。除吸附性能外,PPy 还具有优异的光热转换特性,生物相容性强,可作为光热转换材料在太阳能界面蒸发中生产清洁水^[15,70]。

由于茄子碳气凝胶制备过程高能耗、机械性能差、缺少弹性回复性能,且不能去除蒸发介质中的有害物质。因此,制备了茄子/聚吡咯(Polypyrrole-modified natural eggplant, PPy@eggplant)复合气凝胶,对其力学性能、形状回复能力及其光热水蒸发协同重金属离子吸附性能进行研究,主要内容有:(1)优化聚吡咯含量,探究不同含量聚吡咯的 PPy@eggplant 气凝胶的光热水蒸发性能,确定最优比例。(2)优化 PPy@eggplant 气凝胶厚度,探究不同厚度的 PPy@eggplant 气凝胶的水蒸发性能,确定最优厚度。(3)设计挤压-扭转形状回复实验,探究 PPy@eggplant 气凝胶的力学性能及其形状回复能力。

(4)将 PPy@eggplant 气凝胶分别对不同染料模拟废水进行蒸发实验,探究染料废水蒸发速率。(5)将 PPy@eggplant 气凝胶分别对不同重金属离子溶液和含有重金属离子的染料溶液进行蒸发实验,探究其水蒸发速率。(6)组装动态太阳能界面水蒸发系统装置,探究静态/动态同时水蒸发协同重金属离子吸附性能、以及其饱和吸附量。(7)总结以上研究内容,分析阐明 PPy@eggplant 气凝胶水蒸发协同重金属离子吸附机制。

4.2 结果与分析

4.2.1 形貌、润湿性分析

通过光学图像、SEM 图像、3D 超景深图像和 EDS 电子色散光谱对 PPy@eggplant 气凝胶进行评估,以进一步了解其形貌、润湿性和元素性质。如图 4-1a 所示,所得的 PPy@茄子气凝胶可以自由地站立在花朵和蒲公英绒毛上,表明其低密度和高孔隙率。如表 4-1 所示,茄子气凝胶和 PPy@eggplant 气凝胶都表现出低密度和高孔隙率,尽管

密度随着 PPy 含量的增加而增加, 孔隙率降低; PPy@eggplant-0.1 的密度和孔隙率的计算结果分别为 $0.0349 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 92.16%。从图 4-2a 可以看出, 所制备的茄子气凝胶呈现出蜂窝状的多孔结构; 碱处理后, 茄子气凝胶虽然部分孔洞坍塌, 但仍保留了多孔结构 (图 4-2b); 此外, PPy@eggplant 气凝胶的较大直径孔洞和表面褶皱增加, 利于溶液进入, 增加表面吸附位点 (图 4-2c)。

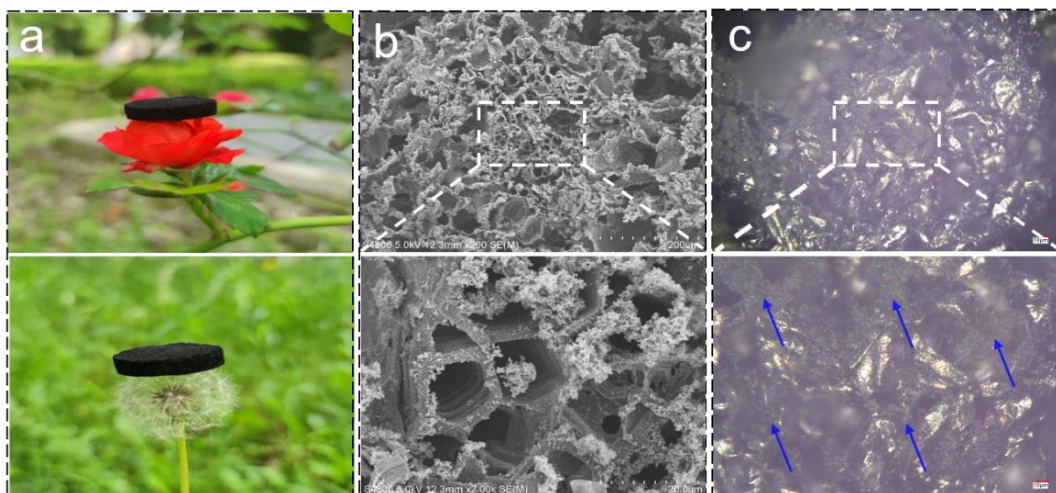


图 4-1 PPy@eggplant 气凝胶的形态: a) PPy@eggplant 气凝胶放置在花朵和蒲公英绒毛上; b) PPy@eggplant 气凝胶的 SEM 图; c) PPy@eggplant 气凝胶的 3D 超景深图像。

Fig. 4-1 Morphology of PPy@eggplant aerogel: a) PPy@eggplant aerogel standing on the flower and dandelion fluff; b) SEM images of PPy@eggplant aerogel; c) 3D ultra-depth-of-field images of PPy@eggplant aerogel.

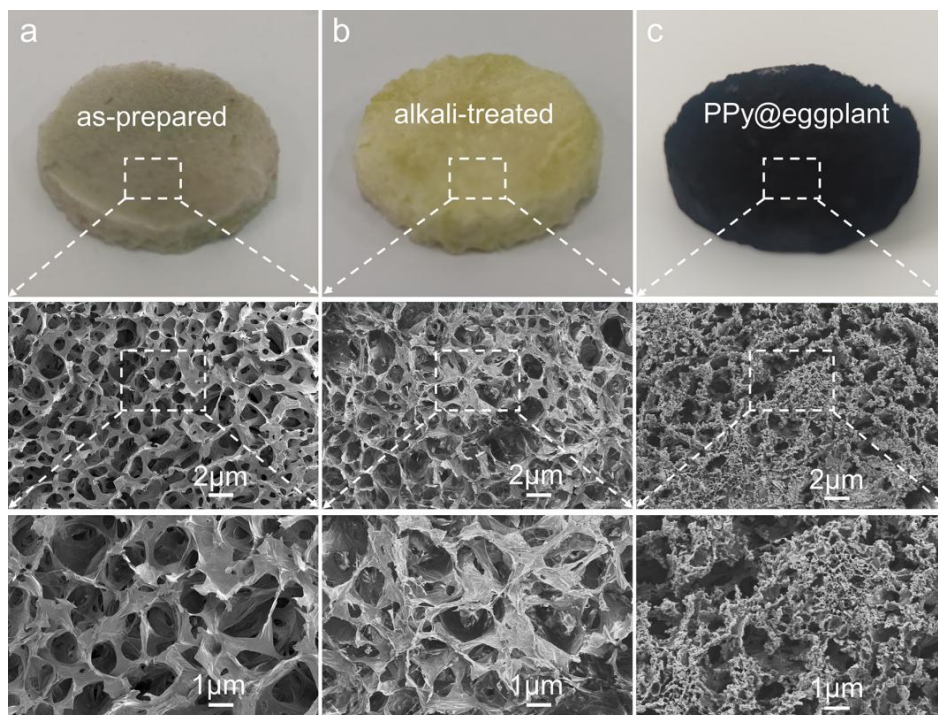


图 4-2 茄子气凝胶的光学图片和 SEM 图: a) 制备前气凝胶; b) 碱处理气凝胶; c) PPy@eggplant 气凝胶。

Fig. 4-2 Optical and SEM images of eggplant aerogels: a) as-prepared aerogel; b) alkali-treated aerogel; and c) PPy@eggplant aerogel.

由图 4-1b 和图 4-2c 表明, 气凝胶中形成了大量的 PPy 颗粒, 原位聚合引入 PPy 后,

气凝胶的多孔结构得以保留。如图 4-1b 所示, PPy@eggplant 气凝胶开发了微米级的孔洞, 产生了毛细效应用于水的补充, 并为 PPy 锚定和重金属离子吸附提供了更多的位点 [130-131]。此外, 原位聚合 (图 4-1b 和图 4-1c, 用蓝色箭头标记) 后, PPy 均匀分布在茄子基质内部, 增强了对太阳光的吸附, 提供了更多与重金属离子的接触面积。由图 4-3 可知, 在原位聚合过程中, 随着吡咯含量的增加, 形成了更多的 PPy。

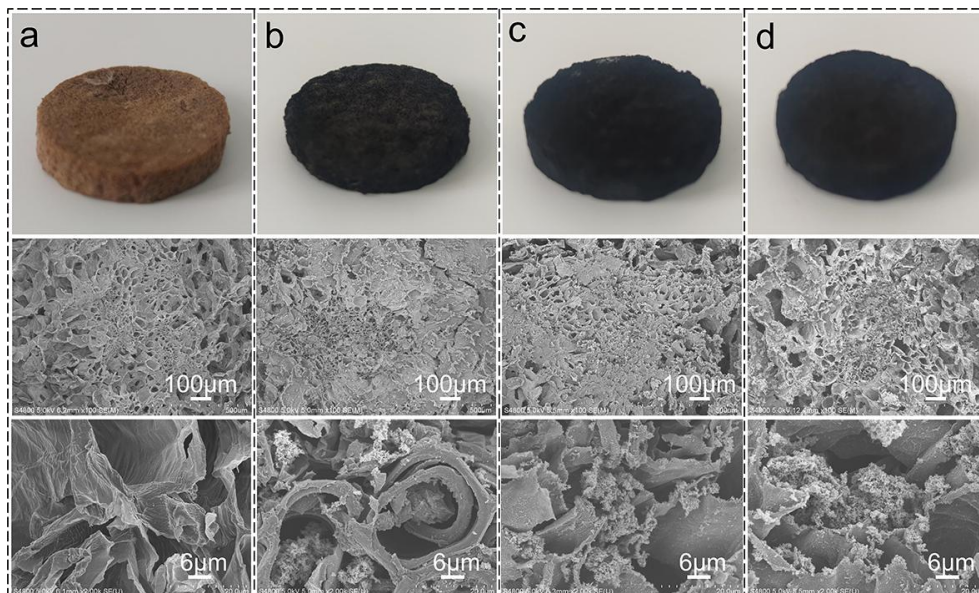


图 4-3 不同 PPy 含量的 PPy@eggplant 气凝胶的光学图片和 SEM 图: a) PPy@eggplant-0.01; b) PPy@eggplant-0.05; c) PPy@eggplant-0.1; d) PPy@eggplant-0.15.

Fig. 4-3 Optical and SEM images of PPy@eggplant aerogels with different PPy contents: a) PPy@eggplant aerogel-0.01; b) PPy@eggplant aerogel-0.05; c) PPy@eggplant aerogel-0.1; and d) PPy@eggplant aerogel-0.15.

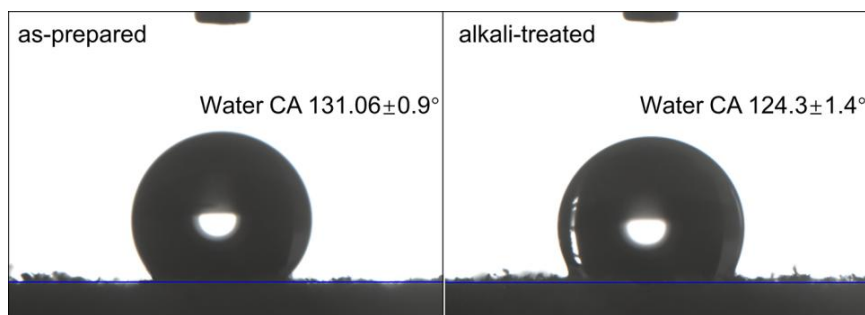


图 4-4 制备前和碱处理的茄子气凝胶的水接触角。

Fig. 4-4 Water CA of as-prepared and alkali-treated eggplant aerogels.

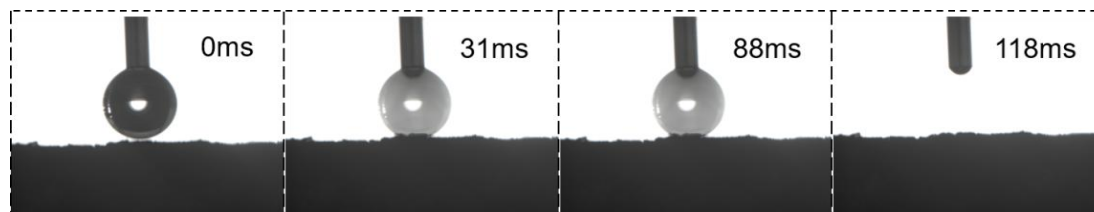


图 4-5 水滴在 PPy @茄子气凝胶表面充分铺展。

Fig. 4-5 Water droplet fully spread on the PPy@eggplant aerogel surface.

材料润湿性是太阳能蒸发过程中水分补充的关键参数。如图 4-4a 所示, 制备前的茄子气凝胶的水接触角为 $131.06 \pm 0.9^\circ$, 表明所制备的茄子气凝胶具有疏水性。碱处理后,

接触角降至 $124.3 \pm 1.4^\circ$ (图 4-4b), 进一步证明了在此过程中水溶性物质的去除。不同的是, 如图 4-5 所示, 水滴在 118 ms (接触角为 0°) 内完全铺展在 PPy@eggplant 气凝胶上, 表明水蒸发过程中具有超亲水性和优异的补水能力。茄子和 PPy 的本征亲水性以及开发的高度粗糙表面导致了超亲水性, 这与之前的研究一致, 即通过增加亲水性材料的表面粗糙度可以实现亲水性的改善^[132]。如图表 4-1 所示, 优异的水分补充能力进一步表现为突出的饱和吸水量为 $28.22 \pm 0.20 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (PPy@eggplant-0.01), $26.91 \pm 0.33 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (PPy@eggplant-0.05), $26.03 \pm 0.10 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (PPy@eggplant-0.1) 和 $25.03 \pm 0.09 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (PPy@eggplant-0.15), 改善了 PPy@eggplant 气凝胶的蒸发性能。此外, 从图 4-6 中可以看出, 流体的高度在 25 s 内达到 60 mm, 流速在前 5 s 内约为 5.2 mm/s, 这都进一步证明了 PPy@eggplant 气凝胶优异的水传输能力。

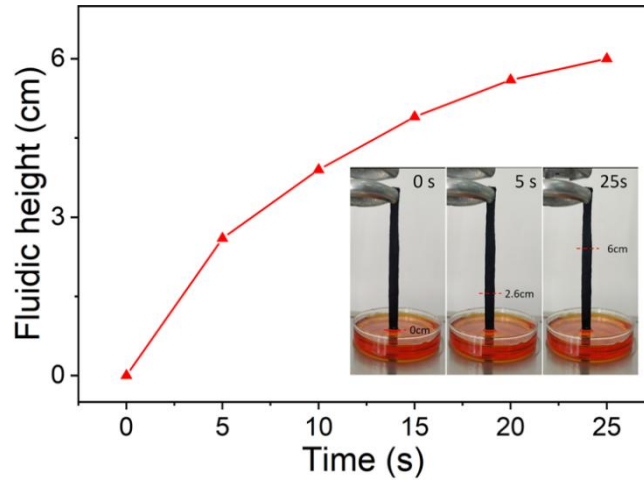


图 4-6 PPy@eggplant 气凝胶的流体高度随时间的变化。
Fig. 4-6 Fluidic height of the PPy@eggplant aerogel with time changes.

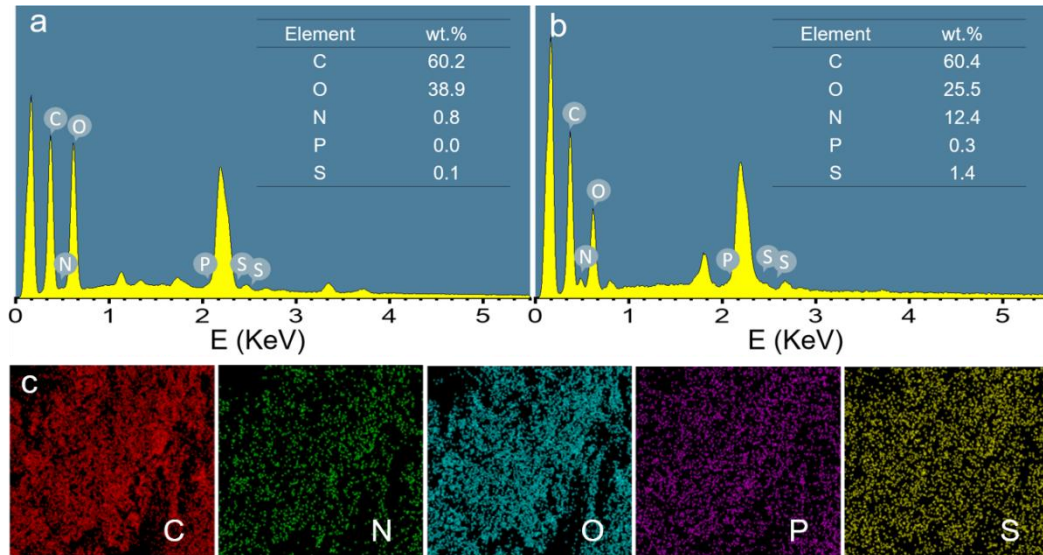


图 4-7 茄子和 PPy@eggplant 气凝胶的 EDS 结果: a) 茄子气凝胶; b) PPy@eggplant 气凝胶; c) C、N、O、P 和 S 元素的电子色散光谱图。

Fig. 4-7 EDS results of eggplant and PPy@eggplant aerogels: a) eggplant aerogel; b) PPy@eggplant aerogels; c) electron dispersive spectroscopy mapping images of C, N, O, P, and S elements.

表 4-1 茄子和 PPy@eggplant 气凝胶的密度、孔隙率和吸水量。

Table 4-1 Density, porosity, and water absorbed for eggplant and PPy@eggplant aerogels.

Samples	Eggplant	PPy@eggplant-0.01	PPy@eggplant-0.05	PPy@eggplant-0.1	PPy@eggplant-0.15
Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.0308	0.0322	0.0343	0.0349	0.0359
Porosity (%)	95.01	94.17	93.61	92.16	91.21
Water adsorption content ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	30.53 ± 1.01	28.22 ± 0.20	26.91 ± 0.33	26.03 ± 0.10	25.03 ± 0.09

EDS 结果如图 4-7a, b 所示, C 和 N 含量的增加, 表明了 PPy 的形成。此外, EDS mapping 图像证明了 PPy@eggplant 气凝胶内部 C、N、O、P 和 S 元素的存在和均匀分布 (图 4-7c), 这些元素构成了大量的活性基团, 有助于气凝胶的亲水性和对重金属离子的吸附。因此, 发达的多孔结构、PPy 的均匀分布、超亲水性和大量的反应基团增强了 PPy@eggplant 气凝胶在清洁水产生和重金属离子去除方面的性能。

4.2.2 结构特征和元素分析

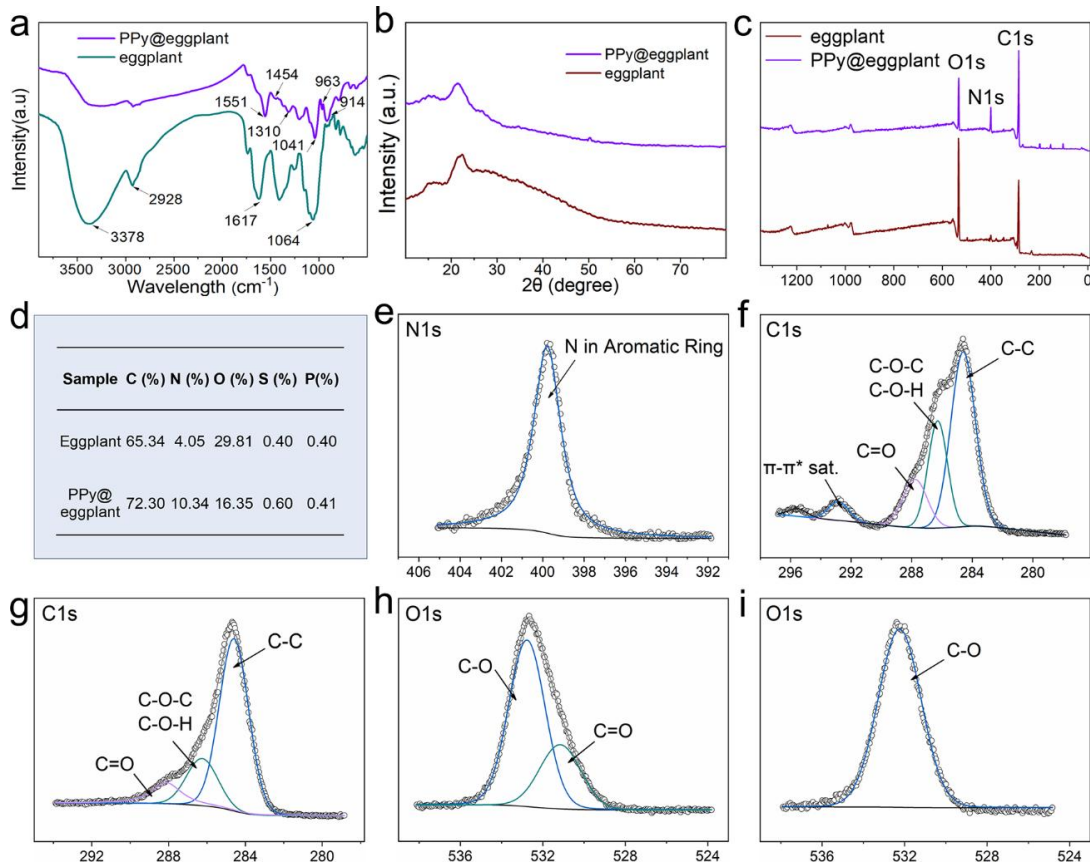


图 4-8 茄子和 PPy@eggplant 气凝胶的 FTIR、XRD 和 XPS 光谱: a-c)茄子和 PPy@eggplant 气凝胶的 FTIR、XRD 和 XPS 光谱; d) XPS 数据中的元素百分比; e) PPy@eggplant 气凝胶的 N 1s; f)茄子气凝胶的 C 1s; g) PPy@eggplant 气凝胶的 C 1s; h) 茄子气凝胶的 O 1s;和 i) PPy@eggplant 气凝胶的 O 1s. **Fig. 4-8** FTIR, XRD, and XPS spectra of eggplant and PPy@eggplant aerogels: a-c) FTIR, XRD, and XPS spectra of eggplant and PPy@eggplant aerogels, respectively; d) element percentages from XPS data; e) N 1s of PPy@eggplant aerogel; f) C 1s of eggplantaerogel; g) C 1s of PPy@eggplant aerogel; h) O 1s of eggplant aerogel; and i) O 1s of PPy@eggplant aerogel.

利用 FTIR 和 XRD 谱图考察了 PPy 聚合前后的结构变化。通过 XPS 谱图评估了茄子和 PPy@eggplant 气凝胶的表面化学性质。如图 4-8a 所示, 茄子气凝胶显示出典型的

纤维素吸附峰, 如 3378 cm^{-1} ($-\text{OH}$ 伸缩振动)、 2928 cm^{-1} ($-\text{CH}_2-$ 伸缩振动)、 1617 cm^{-1} ($-\text{COO}-$ 伸缩振动) 和 1064 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 伸缩振动)^[133]。PPy 聚合后, PPy@eggplant 气凝胶主要表现出 PPy 的特征峰, 如共轭的 1551 cm^{-1} ($\text{C}=\text{C}$ 伸缩振动)、 1454 cm^{-1} ($\text{C}=\text{N}$ 伸缩振动)、 1310 cm^{-1} ($\text{C}-\text{N}$ 伸缩振动)、 1041 cm^{-1} ($\text{C}-\text{H}$ 面外弯曲)、 963 cm^{-1} ($\text{C}-\text{H}$ 面内弯曲) 和 914 cm^{-1} ($\text{C}-\text{H}$ 弯曲), 证明了 PPy 的形成^[134-135]。值得注意的是, 与纯茄子气凝胶相比, PPy@eggplant 气凝胶的主要特征峰发生了蓝移, 这种位移可能是由于茄子中的 $-\text{OH}$ 基团和 PPy 中的 $-\text{NH}-$ 基团形成氢键^[136]。如图 4-8b 所示, 聚吡咯聚合前后的 XRD 图谱几乎没有变化, 说明聚吡咯的改性对晶体结构的影响较小。

图 4-7c-i 给出了 PPy 聚合前后的 XPS 结果。从图 4-7c 可以看出, 与茄子气凝胶相比, PPy@eggplant 气凝胶的 N1s 峰变得尖锐, 这是由于聚合后形成了 PPy。PPy@eggplant 气凝胶中 C 和 N 含量的增加进一步证实了 PPy 的形成 (图 4-7d)。如图 4-7e 所示, PPy@eggplant 气凝胶在 399.78 cm^{-1} 处的 N1s 峰显示出 PPy 环中吡咯氮 ($-\text{NH}-$) 的明显特征。此外, 茄子和 PPy@eggplant 气凝胶的 C1s 在 284.6、286.2 和 288.0 eV 左右出现峰, 分别与 $\text{C}-\text{C}$ 、 $\text{C}-\text{O}-\text{C}/\text{C}-\text{O}-\text{H}$ 和 $\text{C}=\text{O}$ 基团有关, (图 4-7f, g); 与茄子气凝胶相比, PPy@eggplant 气凝胶的 $\text{C}-\text{O}-\text{C}/\text{C}-\text{O}-\text{H}$ 基团的峰变宽 (图 4-7g), 这归因于 $-\text{NH}-$ 和 $-\text{OH}$ 官能团之间的位点特异性相互作用^[137-138]; 茄子气凝胶的 O1s 主峰位于 532.77 eV ($\text{C}-\text{O}$ 官能团) (图 4-7h), 而 PPy@eggplant 气凝胶的 O1s 主峰降低至 532.24 eV ($\text{C}-\text{O}$ 官能团) (图 4-7i), 这主要是由于茄子中的 $-\text{OH}$ 基团与 PPy 环中的 $-\text{NH}$ 基团之间的相互作用^[134,139]。

4.2.3 材料力学性能分析

在实际应用过程中, 材料的力学性能影响着存储和运输、操作和长期稳定性。因此, 通过干态下的压缩性能和湿态下的形状可回复性来评价 PPy@eggplant 气凝胶的力学性能。如图 4-9 所示, PPy@eggplant 气凝胶的压缩应力达到 43.85 kPa , 是茄子气凝胶 (24.38 kPa) 的 1.8 倍, 压缩应力的增强是由于茄子与 PPy 之间形成了氢键。

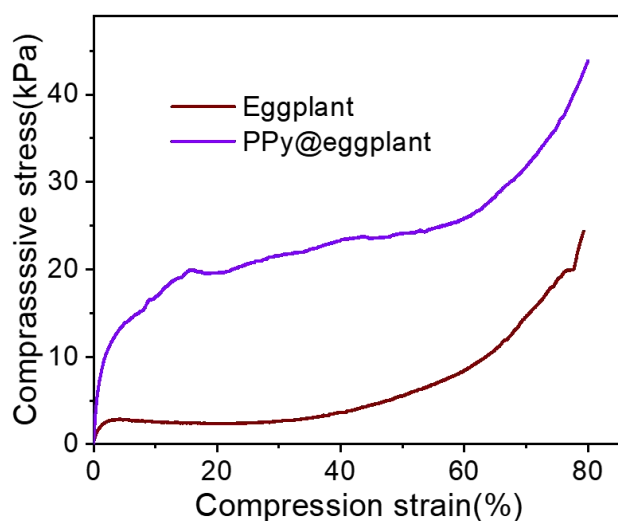


图 4-9 茄子和 PPy@eggplant 气凝胶的压缩性能。

Fig. 4-9 Compression property of eggplant and PPy@eggplant aerogels.

如图 4-10 所示, PPy@eggplant 气凝胶在 200 g 的重量下压制 24 h 后仍能保持其尺

寸, 具有良好的尺寸稳定性。值得注意的是, PPy@eggplant 气凝胶在水介质中使用时, 可以受到各种形式和大小外力作用。因此, 在水中的尺寸稳定性是非常重要的, 正如以前的研究报道的那样, MXene/明胶气凝胶的设计是为了寻求与干压缩抗力和湿回弹性相关的增强机械性能^[140]。



图 4-10 PPy@eggplant 气凝胶被 200 g 砝码压制 24 h 前后的光学图像。

Fig. 4-10 Optical images of PPy@eggplant aerogel before and after being pressed for 24 h by a 200-g weight.

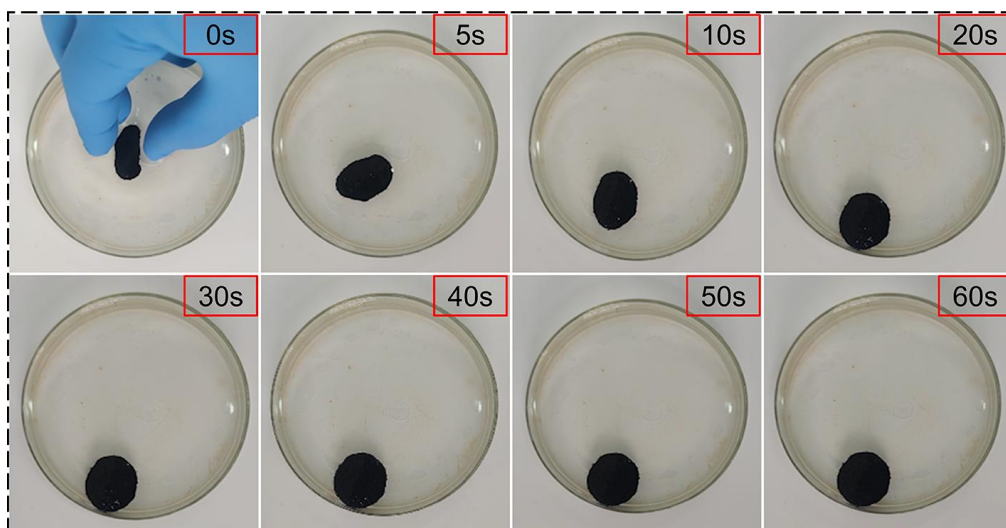


图 4-11 挤压后形状回复动态过程的光学图像。

Fig. 4-11 Optical images of the dynamic process of shape recovery after squeezing.

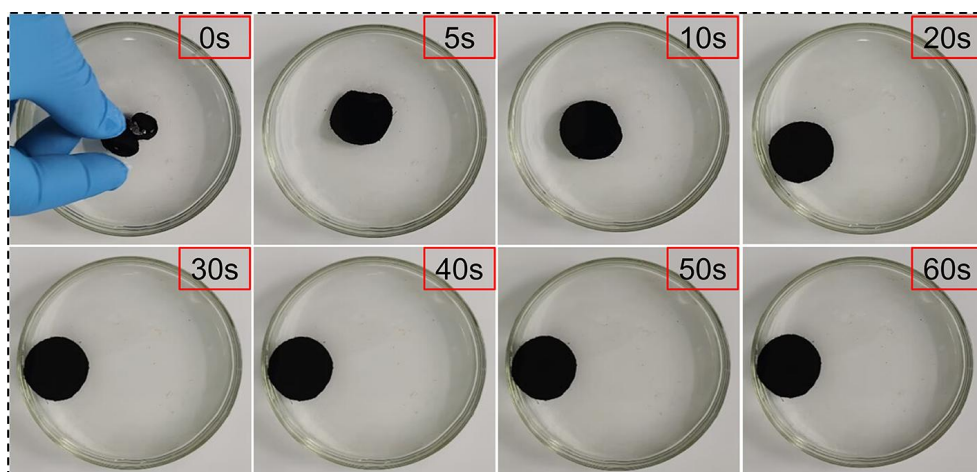


图 4-12 扭转后形状回复动态过程的光学图像。

Fig. 4-12 Optical images of the dynamic process of shape recovery after twisting.

如图 4-11 所示, 经过挤压后, PPy@eggplant 气凝胶可以在 50 s 内回复形状, 表明其在水中具有优异的尺寸稳定性。PPy@eggplant 气凝胶在扭转后 50 s 内回复形状的能

力进一步证明了其在水中的尺寸稳定性（图 4-12）。为了进一步验证 PPy@eggplant 气凝胶在水中的回复性能，进行了 10 次挤压和扭转实验，如图 4-13 所示，即使经过 10 次挤压和扭曲后（第 10 次直径分别为第 2 次直径的 95.92%和 97.87%），PPy@eggplant 气凝胶仍然回复了原始尺寸，证明了 PPy@eggplant 气凝胶在水中的尺寸稳定性。因此，PPy@eggplant 气凝胶在水中的尺寸稳定性有助于其在实际应用中的长期使用能力。

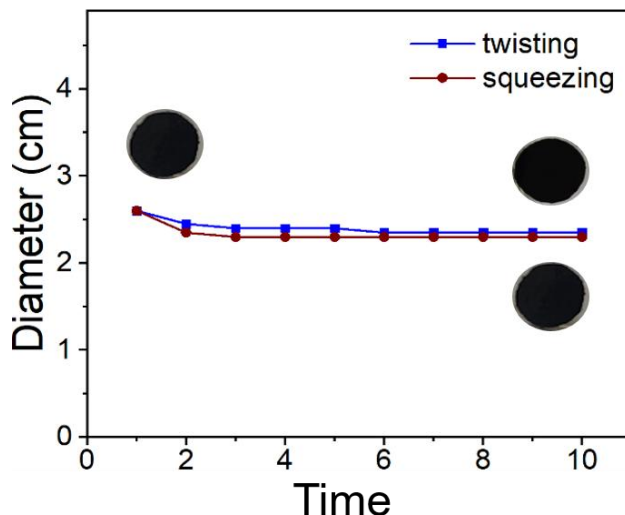


图 4-13 经过挤压和扭转 10 次后 PPy@eggplant 气凝胶直径的变化。

Fig. 4-13 PPy@eggplant aerogel diameter changes after 10 times of squeezing and twisting.

4.2.4 吸光度、导热系数分析

光吸收能力对于材料的蒸发性能至关重要。如图 4-14a, b 所示，与茄子气凝胶相比，PPy@eggplant 气凝胶具有高的光吸收和低的光反射，表明其具有更高的光吸收能力。由图 4-14c 可知，总太阳光吸收率 98.48%，证明了 PPy@eggplant 气凝胶优越的光吸收能力，约为是茄子气凝胶（78.35%）的 1.26 倍。此外，随着 PPy 含量的增加，PPy@eggplant 气凝胶的光吸收能力增强（图 4-14d）。即使较高含量的 PPy 涉及更多的热能，但应协同考虑材料的成本、气凝胶孔隙率和吸水能力，以实现更好的蒸发性能；基于这一概念，对 PPy 的含量进行了优化，并进行了相应的讨论。如图 4-14e 所示，高的光吸收能力可以归因于两个因素，第一个因素是发达的高度多孔结构诱导 PPy@eggplant 气凝胶内部产生多重光的衍射和散射^[141]，第二个因素是原位聚合 PPy 的均匀分布提高了光吸收面积，促进了多次光的衍射和散射，这两个因素导致了 PPy@eggplant 气凝胶优异的光吸收性能。正如之前的研究报道^[142]，PPy@eggplant 气凝胶在湿状态下的光吸收为 99.87%，高于干燥状态下的光吸收。PPy@eggplant 气凝胶在湿状态下较好的光吸收能力有助于其在太阳能水蒸发过程中表现出优异的性能。

除光吸收能力外，热管理能力对蒸发性能也至关重要，以抑制蒸发过程中的热能损失。如图 4-14f 所示，PPy@eggplant 气凝胶具有较低的热导率 $0.039 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，低于之前的碳膜（ $0.049 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）^[105]、碳泡沫（ $0.068 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）^[104]、碳纳米管（ $0.100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）^[102]、多孔碳（ $0.113 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）^[103]，与光热/催化纳米纤维气凝胶（ $0.032 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）^[143]、热压三聚氰胺泡沫（ $0.033 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）^[144]相匹配；此外，PPy@eggplant 气凝胶的低热导率与用作光热系统隔热材料的 $0.036 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的 EPE 泡沫^[145]和 0.04

$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 的聚苯乙烯泡沫^[106]相媲美, 进一步证明了其优异的隔热性能。低热导率可以抑制热量损失, 并使热能存储在 3D 多孔网络结构中, 从而增强 PPy@eggplant 气凝胶在各种液体介质生成清洁水过程中的蒸发性能。

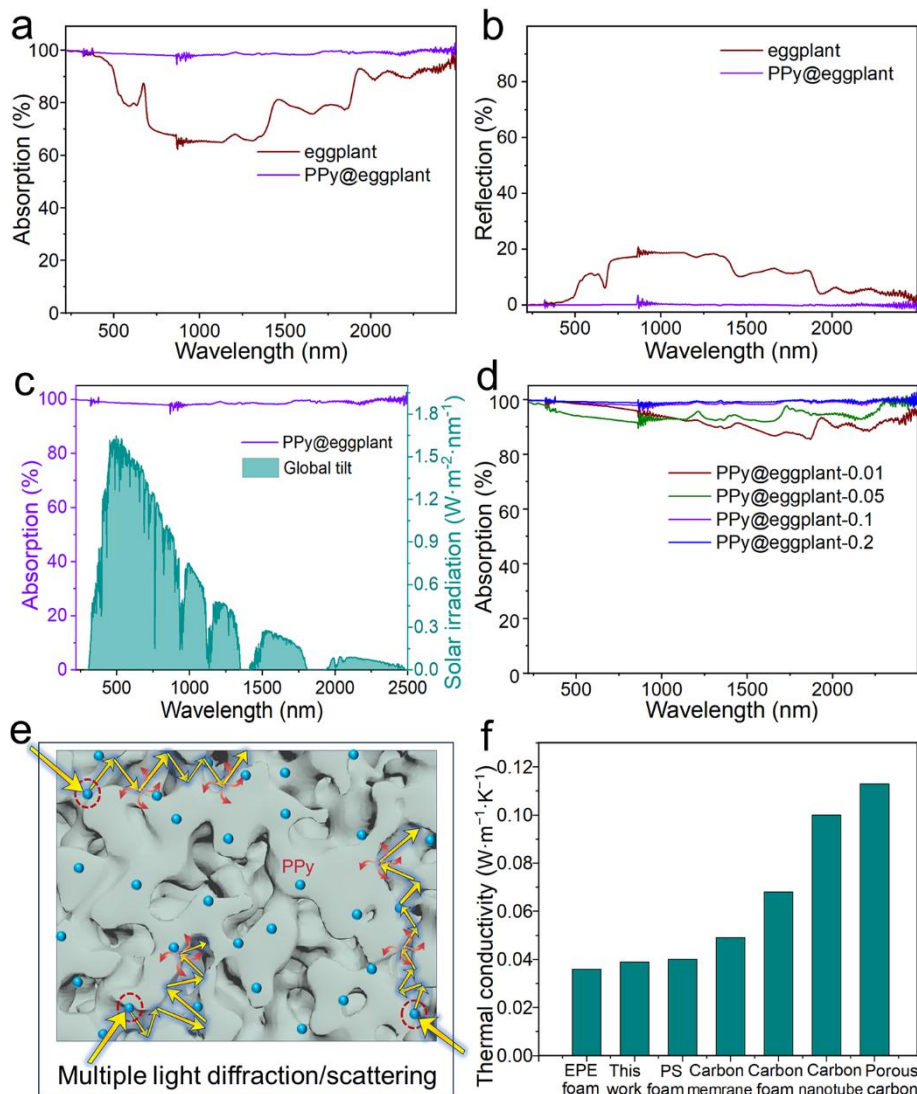


图 4-14 PPy@eggplant 气凝胶的光吸收率和热导率: a & b) 茄子和 PPy@eggplant 气凝胶对光的吸收和反射; c) PPy@eggplant 气凝胶的总光吸收率; d) 不同 PPy 含量的 PPy@eggplant 气凝胶的总光吸收率; e) 气凝胶内部的光衍射和散射示意图; f) PPy@eggplant 气凝胶和其他已报道材料的导热系数。

Fig. 4-14 Light absorption and thermal conductivity of PPy@eggplant aerogels: a & b) light adsorption and reflection of eggplant and PPy@eggplant aerogels, respectively; c) total light absorbance of PPy@eggplant aerogel; d) total light absorbance of PPy@eggplant aerogel with different PPy contents; e) schematic diagram of light diffraction and scattering inside the aerogel, and f) thermal conductivity of PPy@eggplant aerogel and other reported materials.

4.3 PPy@eggplant 气凝胶光热转换性能

4.3.1 聚吡咯含量对光热水蒸发性能的影响

采用不同 PPy 含量的 PPy@eggplant 气凝胶对纯水的蒸发性能进行评价, 以优化 PPy 含量。同时, 以纯水和茄子气凝胶的蒸发作为对照。如图 4-15a 所示, 纯水和茄子气凝胶光热水蒸发 1 h 后, 水质量损失分别为 0.34 和 $0.83 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, PPy 改性后, PPy@eggplant-0.01 气凝胶的水质量损失增加到 $0.99 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 表明 PPy 的改性可以提高

其蒸发性能；随着 PPy 含量的增加，PPy@eggplant-0.05 气凝胶和 PPy@eggplant-0.1 气凝胶的水质量损失进一步增加至 $1.75 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $2.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，随后，PPy@eggplant-0.15 气凝胶 ($1.92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 的水质量损失降低；相应地，纯水、茄子气凝胶和 PPy@eggplant 气凝胶的蒸发速率分别为 0.34、0.83、0.99、1.75、2.05 和 $1.92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 4-15b)。其中，PPy@eggplant-0.1 气凝胶的蒸发效率最高，为 128.47%，高于其他 PPy@eggplant 气凝胶，分别约为茄子气凝胶和纯水蒸发效率的 2.47 倍和 6.03 倍。太阳能水蒸发过程中的能量损失评估结果表明，传导、对流和传导损失分别为 $8.29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $8.00 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $107.73 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，证明了更多的能量被用于蒸发水介质，从而获得了优异的蒸发性能。蒸发过程中的温度变化进一步支持了上述结果。

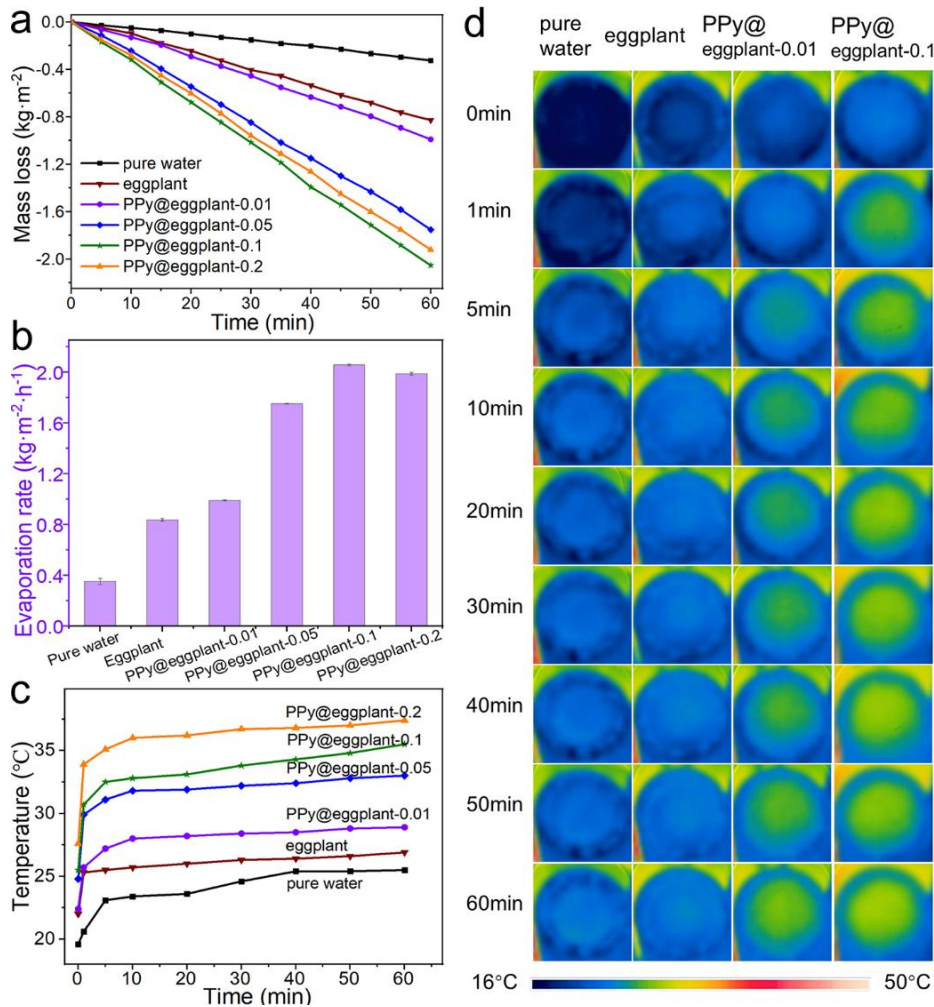


图 4-15 不同 PPy 含量的蒸发性能: a & b) 纯水、茄子气凝胶和 PPy@eggplant 气凝胶 1 h 后的水质量损失和蒸发速率; c) 水蒸发过程中的温度变化; d) 纯水、茄子气凝胶和 PPy@eggplant-0.1 气凝胶在水蒸发过程中的红外热图像。

Fig.4-15 Evaporation performance for different PPy contents: a & b) water mass losses and evaporation rates after 1 h for pure water, eggplant aerogel, and PPy@eggplant aerogels, respectively; c) temperature changes during water evaporation; and d) infrared thermal images of pure water, eggplant aerogel, and PPy@eggplant-0.1 aerogels during water evaporation.

如图 4-15c 所示，纯水、茄子气凝胶和 PPy@eggplant-0.01 的平衡温度分别为 23.4、25.7 和 28.0°C ，随着 PPy 含量的增加，平衡温度显著增加到 31.8°C (PPy@eggplant-0.05)， 32.8°C (PPy@eggplant-0.1) 和 36.0°C (PPy@eggplant-0.15)。如图 4-15d 所示，红外

热像图进一步证实了纯水和茄子气凝胶的颜色变化不大,表明光热转换较差。经 PPy 修饰后, PPy@eggplant-0.01 的蓝色逐渐变为黄色,而 PPy@eggplant-0.1 气凝胶的变化更为明显。值得注意的是, PPy@eggplant-0.1 气凝胶在 1 h 后达到了最佳的蒸发性能,随着 PPy 添加量的增加,其光吸收能力增强(图 4-14d),而吸水能力减弱(表 4-1)。由此可以推断, PPy@eggplant-0.1 气凝胶达到了这两方面的最佳组合。 PPy@eggplant-0.1 气凝胶的蒸发性能优于 PPy@eggplant-0.15 气凝胶,而後者的吸水能力不如 PPy@eggplant-0.01 和 PPy@eggplant-0.05 气凝胶,光吸收能力也有限。因此,选择 PPy@eggplant-0.1 气凝胶作为优化的 PPy 含量,进一步优化气凝胶厚度。

4.3.2 材料厚度对光热水蒸发性能的影响

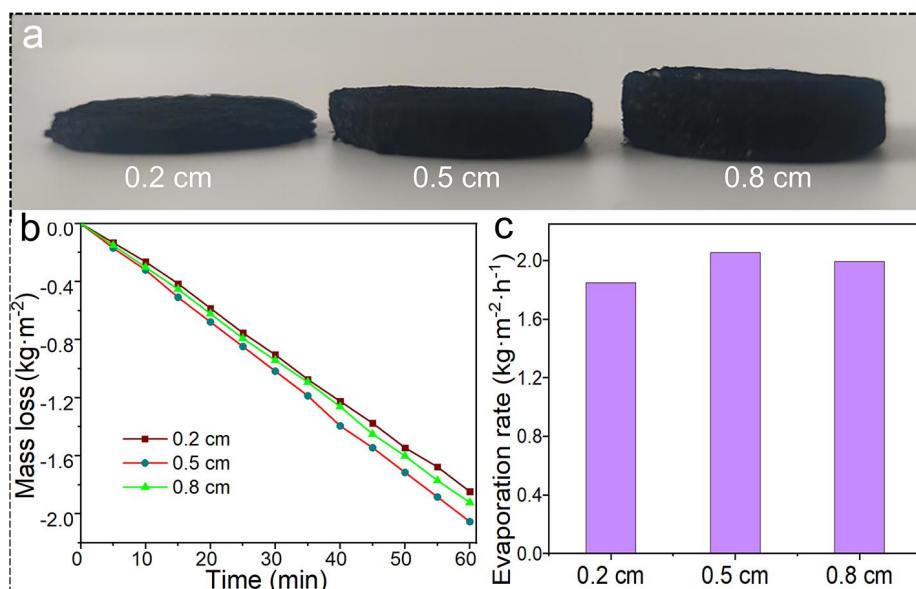


图 4-16 不同高度的 PPy@eggplant 气凝胶的蒸发性能: a)不同高度的 PPy@eggplant 气凝胶的光学图像; b)不同高度的 PPy@eggplant 气凝胶的水质量损失; c)不同高度的 PPy@eggplant 气凝胶的蒸发速率。

Fig.4-16 Evaporation performance of PPy@eggplant aerogels with different heights: a) optical images of PPy@eggplant aerogels with different heights; b) water mass losses of PPy@eggplant aerogels with different heights; and c) evaporation rates of PPy@eggplant aerogels with different heights.

如图 4-16a 所示,光热水蒸发 1 h 后,厚度为 0.2、0.5 和 0.8 cm 的 PPy@eggplant 气凝胶的水质量损失分别为 1.85、2.05 和 1.99 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 4-16b)。相应地,三种气凝胶的水蒸发速率分别为 1.85、2.05 和 1.99 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 4-16c)。0.2 cm 的气凝胶厚度可能会造成大量热量损失,直接对本体水加热,而 0.8 cm 的气凝胶厚度可能会使太阳能材料与水之间的接触面积较小,限制了水分供应,两者共同导致比气凝胶厚度为 0.5 cm 时更低的蒸发速率。因此,选择 PPy 含量为 0.1 g、气凝胶厚度为 0.5 cm 的 PPy@eggplant 气凝胶为最优气凝胶,进而验证其在清洁水产生和重金属离子吸附方面的性能。

4.3.3 PPy@eggplant 气凝胶水蒸发及重金属离子吸附性能

首先,分别评估 PPy@eggplant 气凝胶对染料废水的蒸发性能和对重金属离子水溶液的吸附性能。如图 4-17a 所示,MB、MO 和 RhB 溶液光热水蒸发 1 h 后的水质量损失分别为 1.98、1.94 和 1.92 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。相应地,MB、MO 和 RhB 溶液的蒸发速率分别为 1.98、1.94 和 1.92 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 4-17b)。如图 4-17c 和图 4-18a, b 所示,三种蒸发溶

液的吸光度曲线的 UV-vis 光谱的结果几乎显示出一条水平线, 证明了各种染料水样产生清洁水的能力。从图 4-17d 中可以明显看出, 经过 30 和 60 min 处理后, 太阳光和黑暗条件下 RhB 溶液的吸光度差异不大, 说明 PPy@eggplant 气凝胶在处理染料水时以染料吸附为主。染料废水的蒸发实验表明, 所制备的 PPy@eggplant 气凝胶可以有效地从各种染料水样中产生清洁水, 并且具有较高的蒸发速率。如表 4-2 所示, 染料废水蒸发的蒸发速率高于文献报道的膜基蒸发器, 如碳纳米管基膜 ($1.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [146], MXene 水凝胶膜 ($1.82 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [147]; 气凝胶蒸发器, 如丝素蛋白/碳纳米纤维气凝胶 ($1.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [148], 纤维素纳米纤维/聚乳酸/聚苯胺气凝胶 ($1.57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [149], 改性纤维素气凝胶 ($1.31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [150]; 水凝胶蒸发器, 如碳纳米管/海藻酸钠水凝胶为 ($1.69 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [151], 丁烷四羧酸/聚吡咯水凝胶 ($1.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [152], 聚丙烯酸钠/碳化丝瓜络水凝胶 ($1.83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [153], 其他蒸发器[74,154~156]。

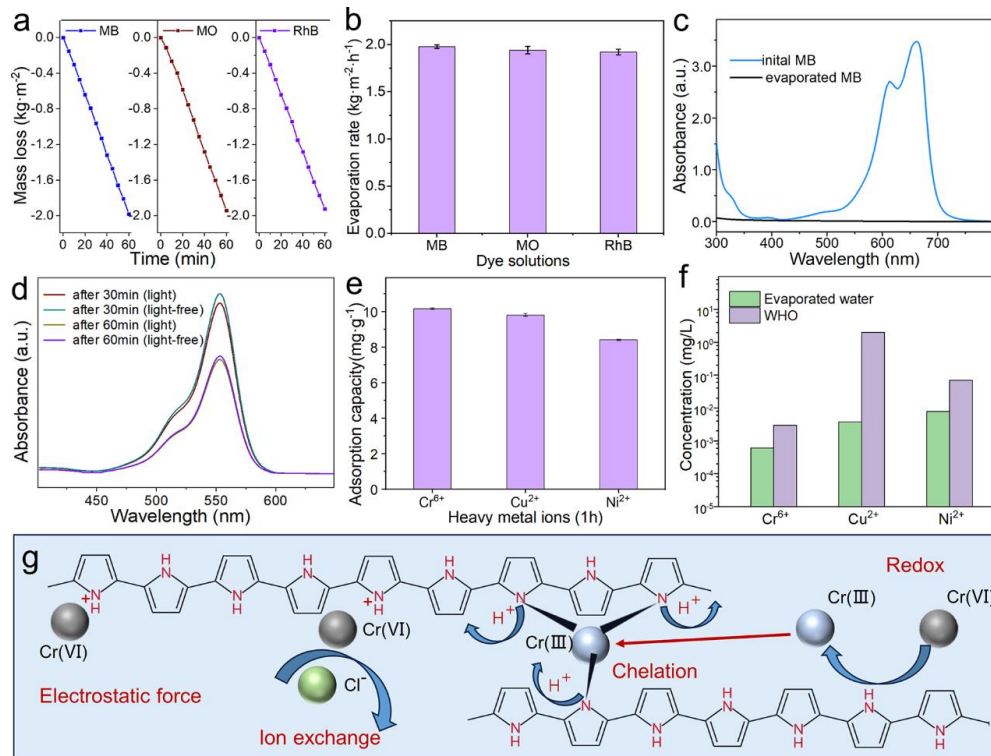


图 4-17 PPy@eggplant 气凝胶的蒸发和重金属离子吸附性能: a & b) MB、MO 和 RhB 溶液的质量损失和蒸发速率; c) 初始 MB 溶液和相应蒸发水的 UV-vis 光谱; d) 在太阳光和无光条件下水蒸发分别处理 30 min 和 60 min 后 RhB 溶液的 UV-vis 光谱; e) 1 h 后 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附容量; f) 蒸发水中 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 离子浓度与世界卫生组织标准的比较; g) Cr^{6+} 离子吸附过程示意图。

Fig. 4-17 Evaporation and heavy metal ion adsorption performance of PPy@eggplant aerogel: a & b) mass losses and evaporation rates of MB, MO, and RhB solutions, respectively; c) UV-vis spectra of initial MB solution and subsequent evaporated water; d) UV-vis spectra of RhB solutions after 30- and 60-min treatment under solar water evaporation and light-free conditions, respectively; e) adsorption capacity of Cr^{6+} , Cu^{2+} , and Ni^{2+} after 1 h; f) comparison of Cr^{6+} , Cu^{2+} , and Ni^{2+} ion concentrations in evaporated water with WHO standards; and g) schematic diagram of Cr^{6+} ion adsorption process.

分别配制浓度为 50 mg/L 的重金属离子 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 溶液, 测试 PPy@eggplant 气凝胶吸附 1 h 内的吸附量, 以评价其吸附重金属离子的性能。如图 4-17e 所示, 对 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附容量分别为 10.16 、 9.81 和 $8.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 说明 PPy@eggplant 气凝胶对各种金属离子具有良好的吸附能力。在此基础上, 选择 MB 水溶液和 Cr^{6+} 金属离子作为

含重金属离子的染料废水模型，考察 PPy@eggplant 气凝胶同时清洁水生产和重金属离子吸附的性能。如图 4-17f 所示，还测试了蒸发水中 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的离子浓度，蒸发水中的离子浓度均低于国际标准，证明 PPy@eggplant 气凝胶可以从含有重金属离子的废水中产生高质量的清洁水。与此同时，并提出了 Cr^{6+} 离子的吸附机理，以便更清楚地了解吸附过程。如图 4-17g 所示，吸附过程涉及 4 个步骤^[157-158]：（1）PPy 中的 Cr^{6+} 阴离子基团与质子氮 (N^+) 产生静电引力，被吸附到气凝胶表面；（2）在聚合过程中，PPy 中掺杂的 Cr^{6+} 和 Cl^- 之间发生离子交换；（3） Cr^{6+} 被部分还原为 Cr^{3+} ，Py 中的 $-\text{NH}-$ 官能团转化为 $=\text{N}-$ ；（4）通过与去质子化的 PPy 氨基的螯合作用， Cr^{3+} 固定在气凝胶表面。

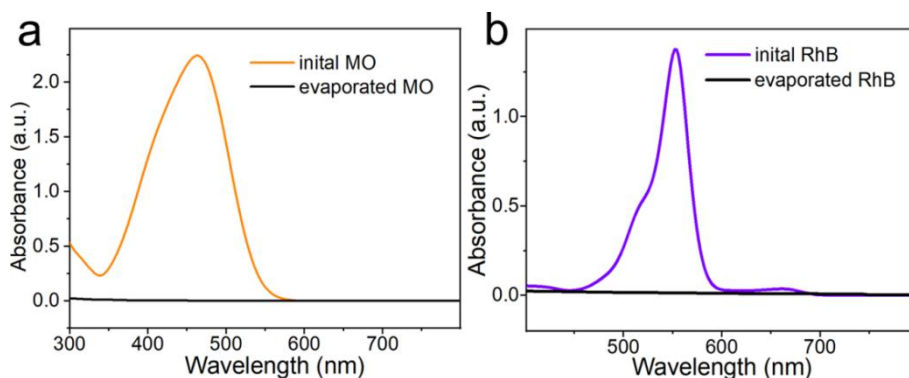


图 4-18 初始溶液和相应蒸发的水的 UV-vis 光谱: a) MO 溶液; b) RhB 溶液.

Fig. 4-18 UV-vis spectra of initial solutions and subsequent evaporated water: a) MO solution; and b) RhB solution.

表 4-2 与之前关于染料废水蒸发速率的报道进行比较.

Table 4-2 Comparison with the previous reports of evaporation rates from dye water.

Materials	Model Dye	Evaporation Rate ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	Reference
Carbon nanotube-based membrane	RhB	1.30	[146]
MXene hydrogel membrane	RhB	1.82	[147]
Silk fibroin/carbon nanofiber aerogel	MB	1.28	[148]
Cellulose nanofiber/poly(lactic acid)/polyaniline aerogel	MO/RhB	1.57	[149]
Modified cellulose aerogel	MO	1.31	[150]
Carbon nanotube/sodium alginate hydrogel	MB/MO	1.69	[151]
Butane tetracarboxylic acid/PPy hydrogel	MO	1.85	[152]
Sodium polyacrylate/carbonized loofah hydrogel	RhB	1.83	[153]
Ni-G-MoO ₃ -x	Wastewater	0.67	[74]
Charge-transfer complex cocrystals	MB	1.67	[154]
Graphene oxide-based membrane	MB/RhB	1.85	[155]
Flower-like cobalt tetroxide	MB	1.90	[156]
PPy@eggplant aerogel	MB/MO/RhB	1.98/1.94/1.92	This work

4.3.4 PPy@eggplant 气凝胶的水蒸发和重金属离子吸附的同时性能

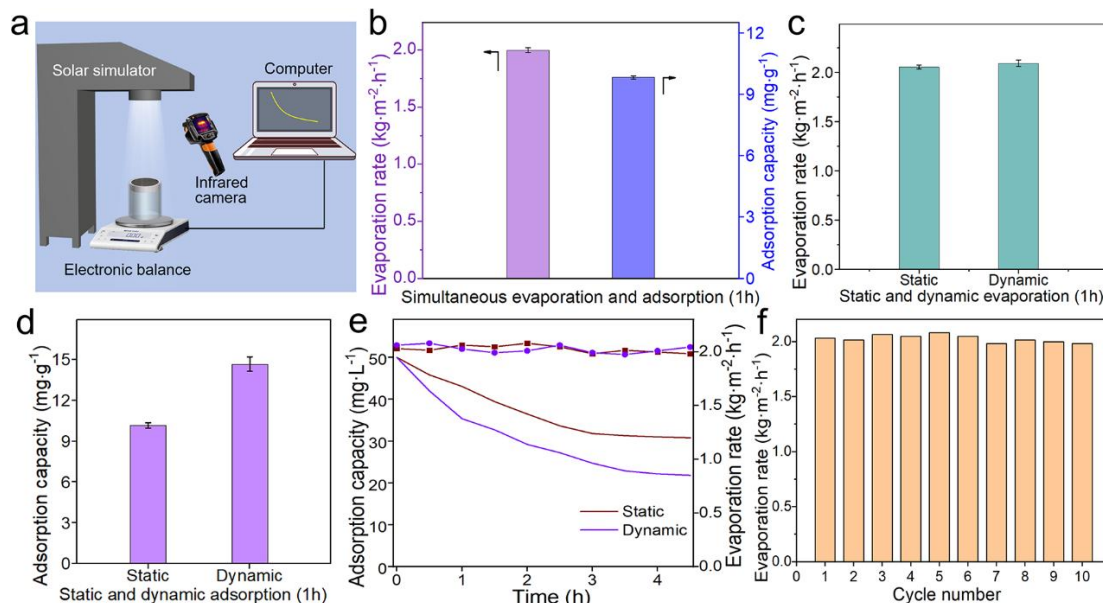


图 4-19 PPy@eggplant 气凝胶同时蒸发和吸附重金属离子的性能: a) 实验所用蒸发系统示意图; b) 1 h 后同时蒸发率和重金属离子吸附量; c) 1 h 后静态和动态条件下的蒸发速率; d) 1 h 后静态和动态条件下的吸附量; e) 长期蒸发速率和吸附量; f) 10 次蒸发周期的蒸发速率。

Fig. 4-19 Simultaneous performance of evaporation and heavy metal ion adsorption of PPy@eggplant aerogel: a) schematic diagram of the evaporation system used in the test; b) simultaneous evaporation rate and heavy metal ion adsorption capacity after 1 h; c) evaporation rates under static and dynamic conditions after 1 h; d) adsorption capacity under static and dynamic conditions after 1 h; e) evaporation rate and adsorption capacity for long time; and f) evaporation rates for ten evaporation cycles.

如图 4-19a 所示, 一个自制的系统被用于验证 PPy@eggplant 气凝胶的同时性能, 包括模拟光源, 红外辐射计, 与计算机相连的电子天平, MB 染料水 (50 mg/L) 和 Cr^{6+} (50 mg/L) 的烧杯, 以及漂浮在水面上的镂空 EPE 泡沫支撑的 PPy@eggplant 气凝胶。经过 1 h 的测试, PPy@eggplant 气凝胶保留了 $1.99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和 $9.82 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 Cr^{6+} 吸附量 (图 4-19b), 同时测试可以产生与前面单独测试相匹配的结果。此外, 在实际应用中, 水介质一般不是静态的, 而是动态的, 因此, 进行了动态实验; 实验过程中, 将带有转子的烧杯置于磁力搅拌器上, 以一定的转速进行搅拌, 每 30 min 记录一次实验数据; 蒸发速率由蒸发前后水质量的差值计算得到, 吸附量由吸附前后溶液浓度的差值计算得到, 计算中考虑了蒸发水的质量。从图 4-19c 和图 4-19d 可以看出, 与静态测试相比, PPy@eggplant 气凝胶的蒸发速率变化不大, 而 Cr^{6+} 吸附量从 $9.82 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 显著提高到 $14.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 表明 PPy@eggplant 气凝胶可以同时实现清洁水的产生和重金属离子的吸附。随后测试最大饱和吸附量, 进一步确定 PPy@eggplant 气凝胶的性能; 如图 4-19e 所示, 经过测试, PPy@eggplant 气凝胶在保留蒸发速率的同时, Cr^{6+} 吸附量增加到 $18.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (静态测试) 和 $27.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (动态测试), 证明了 PPy@eggplant 气凝胶令人满意的蒸发稳定性和吸附性能。与少数同时产生清洁水和从废水中吸附重金属离子的相关研究相比, PPy@eggplant 气凝胶的 Cr^{6+} 吸附能力能够匹配非贵金属/还原氧化石墨烯涂层木材蒸发器对 Pb^{2+} 的吸附能力, 同时蒸发速率高于已报道的蒸发器 (1 sun , $1.43 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) [159]; 同样, 化学处理的碳化木材显示出优异的 Pb^{2+} 吸附能力, 在 1 个太阳光照射下的蒸发速率比目前的 PPy@eggplant 气凝胶更低 [160], 为 1.85

$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。为了进一步评估气凝胶的稳定性,还进行了长时间的测试,如图 4-19f 所示,经过 10 h 的测试,PPy@eggplant 气凝胶保持相同的蒸发速率,表明在实际长期应用中具有优异的清洁水生产性能和蒸发稳定性。

4.3.5 PPy@eggplant 气凝胶同时水蒸发和重金属离子吸附机理分析

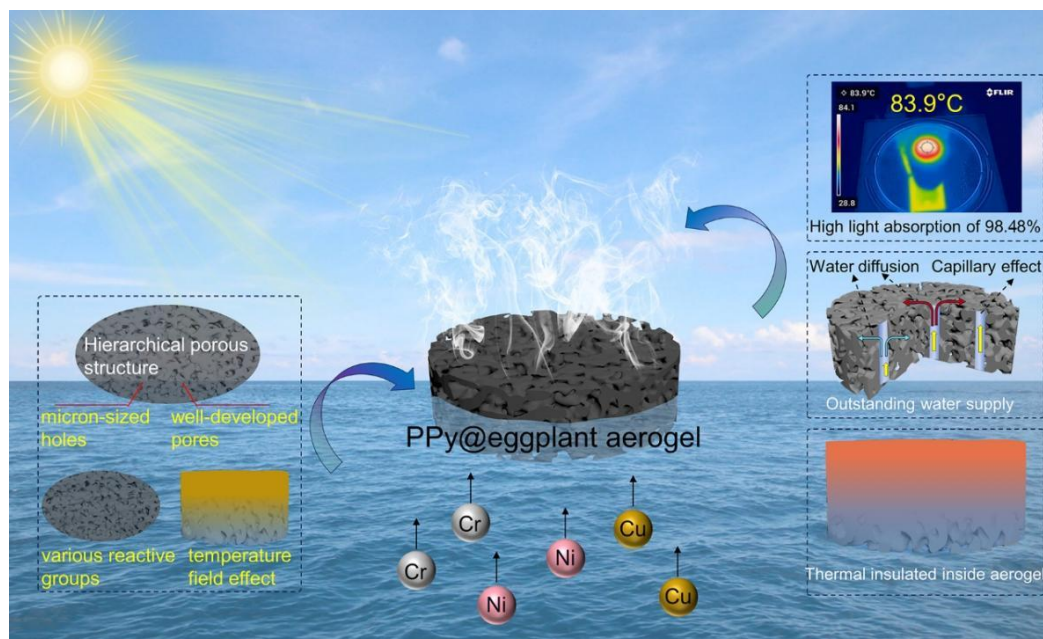


图 4-20 PPy@茄子气凝胶用于同时清洁水产生和重金属离子吸附的优点和机理示意图。

Fig. 4-20 Schematic diagram of merits and mechanism of PPy@eggplant aerogel for simultaneous clean water generation and heavy metal ion adsorption.

上述研究结果表明,PPy@eggplant 复合气凝胶在同时净化水中具有优异的水蒸发性能和重金属离子吸附性能。如图 4-20 所示,相关机制可总结如下:首先,由于气凝胶内部具有发达的多孔结构和 PPy 的均匀分布,PPy@eggplant 气凝胶具有优异的光吸收性能,最高可达 98.48% (在干燥状态下的平衡温度为 83.9 °C),较低的热导率为 $0.039 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,表明更多的热能参与水分蒸发,有助于增强蒸发性能;超亲水性 (水滴在 118 ms 内完全铺展) 和高吸水能力 ($26.033 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) 证明了水分蒸发过程中充足的水分供应。因此,优异的光吸收、良好的热管理和充足的水分供应协同促进了 PPy@eggplant 气凝胶令人印象深刻的蒸发性能。其次,PPy@eggplant 气凝胶表现出微米尺寸的孔洞,直径范围为 $56.7 \mu\text{m}$ 至 $443.1 \mu\text{m}$ (图 4-21)。PPy@eggplant 气凝胶的微米级孔洞和超亲水性使废水很容易进入气凝胶,这些微米级的孔洞为 PPy 的锚定提供了更多的位点,有利于重金属离子的吸附。

此外,PPy@eggplant 气凝胶显示出发达的介孔结构 (图 4-22),丰富的介孔结构为改善静电吸附和离子交换提供了更多的通道和位点,这无疑增强了气凝胶的吸附能力 [161-162]。气凝胶内部各种活性基团的存在可以吸引和锚定更多的金属离子 [163]。水蒸发过程中产生的温度场在固-液界面上诱导了离子浓度梯度,也可能激发更多的活性位点,从而提高在太阳光照射下的吸附性能 [160]。最后,所设计的 PPy@eggplant 气凝胶具有令人印象深刻的形状回复特性,在挤压或扭曲后气凝胶可以回复其形状,有利于长期实际应用中的尺寸稳定性。

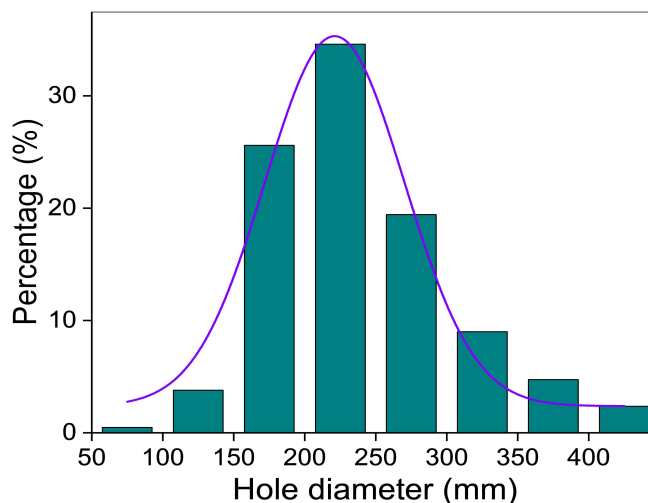


图 4-21 PPy@eggplant 气凝胶孔的直径分布.

Fig. 4-21 Diameter distribution of holes of PPy@eggplant aerogel.

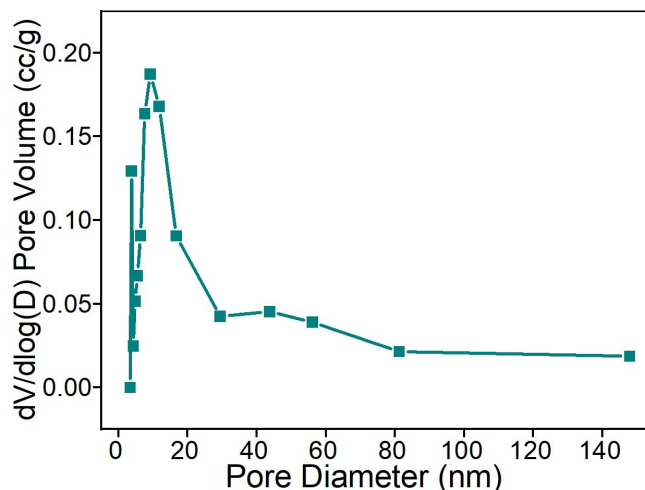


图 4-22 PPy@eggplant 气凝胶的孔径分布.

Fig. 4-22 Pore diameter distribution of PPy@eggplant aerogel.

4.4 本章小结

本章中, 对 PPy@eggplant 复合气凝胶进行了性能表征, 并对其进行了染料废水、重金属离子废水及含有重金属离子的染料废水的光热水蒸发性能研究, 具体研究结果如下:

(1) 通过原位聚合制备的 PPy@eggplant 气凝胶, PPy@eggplant 气凝胶的压缩应力达到 43.85 kPa, 是茄子气凝胶 (24.38 kPa) 的 1.8 倍。在水介质中使用时, 经过挤压和扭转后, PPy@eggplant 气凝胶都可以在 50 s 内回复形状, 表明其在水中具有优异的尺寸稳定性和形状回复能力。进一步对 PPy@eggplant 气凝胶进行了 10 次挤压和扭转实验, 其仍然回复了原始尺寸。此外, PPy@eggplant 气凝胶在 200 g 的重量下压制 24 h 后仍能保持其尺寸, 进一步证明了 PPy@eggplant 气凝胶优异的抗压性能和形状回复能力。

(2) 对不同 PPy 含量的复合气凝胶 PPy@eggplant-0.01、PPy@eggplant-0.05、PPy@eggplant-0.1、PPy@eggplant-0.15 进行水蒸发性能, 以纯水蒸发速率为对照, 确定了 PPy@eggplant-0.1 为最优的 PPy 比例的光热材料。

(3) 以不同厚度 (0.2, 0.5, 0.8 cm) 的 PPy@eggplant-0.1 气凝胶, 研究其水蒸发效果。结果表明 0.2 cm 气凝胶造成向水体加热, 和 0.8 cm 气凝胶水分补充不足导致了较低的蒸发速率, 因此, 选择厚度为 0.5 cm 条件下制备的 PPy@eggplant-0.1 气凝胶为最优光热材料。

(4) 在 PPy@eggplant-0.1 气凝胶对 MB、MO、RhB 废水的蒸发实验中, 其水蒸发速率分别为 1.98、1.94 和 1.92 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 其蒸发水吸光度曲线的 UV-vis 光谱几乎一条水平线, 表明了 PPy@eggplant-0.1 气凝胶在处理纺织工业产生的废水中具有巨大潜力。进一步研究了, 在太阳光和黑暗条件下, 经过 30 和 60 min 光热水蒸发处理后, Rh B 溶液的吸光度差异不大, 说明 PPy@eggplant 气凝胶在处理染料水时以染料吸附为主。

(5) 在 PPy@eggplant 气凝胶对 50 mg/L 的重金属离子 (Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+}) 吸附 1 h 的吸附实验中, 其对 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附容量分别为 10.16、9.81 和 8.41 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其蒸发水中离子浓度均低于国际标准, 说明 PPy@eggplant 气凝胶对各种金属离子具有良好的吸附和清洁水生产能力。

(6) 选择含有 Cr^{6+} 金属离子的 MB 水溶液作为含重金属离子的染料废水模型, 考察 PPy@eggplant 气凝胶同时清洁水生产和重金属离子吸附的性能, 研究了 PPy@eggplant 气凝胶对 Cr^{6+} 重金属离子废水光热水蒸发及其静态/动态吸附性能、饱和吸附量。与静态测试相比, PPy@eggplant 气凝胶的蒸发速率变化不大, 而 Cr^{6+} 吸附量从 9.82 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 显著提高到 14.66 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 表明 PPy@eggplant 气凝胶可以同时实现清洁水的产生和重金属离子的吸附。连续水蒸发和吸附 4 h, 研究表明 PPy@eggplant 气凝胶在保留蒸发速率的同时, Cr^{6+} 离子吸附量增加到 18.2 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (静态测试) 和 27.83 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (动态测试), 证明了 PPy@eggplant 气凝胶令人满意的蒸发稳定性和吸附性能。

(7) 分析阐明了 PPy@eggplant 气凝胶同时水蒸发和重金属离子吸附机理。高度多孔结构、PPy 的均匀分布、各种活性基团和温度场效应赋予了 PPy@eggplant 气凝胶稳定的水蒸发速率和令人满意的 Cr^{6+} 吸附能力。

第5章 结论与展望

5.1 结论

本课题旨在介绍茄子碳 (EC) 气凝胶和茄子/聚吡咯 (PPy@eggplant) 复合气凝胶在海水淡化和清洁水生产领域的开发和应用。主要结论如下:

(一) EC 气凝胶的光热转换及其海水淡化性能。

通过碱处理、冷冻干燥、碳化工艺等工艺制备了 EC 气凝胶, 并对其在盐水的蒸发性能进行了系统评价, 实验、理论方程和数值模拟三者协同验证了 EC 气凝胶高抗盐性。所制备的 EC 气凝胶具有高孔隙率 (97.80%)、优异太阳光吸收率 (97.26%), 超亲水性 (0°), 优异的吸水能力 ($39.76 \pm 0.25 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$), 快速水传输和回流能力 (7.5 mm/s), 有效的热管理能力 ($0.067 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), EC 气凝胶在各种模拟海水样品时表现出高蒸发速率。EC 气凝胶连续蒸发 20 wt.% 和 25 wt.% 的高盐水具有高蒸发性能和耐盐性能, 蒸发速率分别为: $1.68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $1.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。此外, EC 气凝胶对 3.5、15、20 wt.% 的盐水进行 10 h 循环后仍保持其蒸发效率, 表明其具有长期实际应用的潜力。EC 气凝胶对 20 wt.% 的盐水进行在 10 h 的户外测试, 共产生了 $12.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的淡水, 表明 EC 气凝胶具有出色的清洁水生产的能力。

(二) PPy@eggplant 气凝胶的光热转换及其清洁水生产性能。

通过碱处理、冷冻干燥、原位聚合等工艺制备了 PPy@eggplant 复合气凝胶, 并对其在重金属离子废水和染料废水中的蒸发性能进行了系统评价。通过原位聚合, 所得 PPy@eggplant 气凝胶集成了同时清洁水产生和重金属离子吸附的双重功能。基于优异的光吸收能力、良好的热管理和充足的水分供应, PPy@eggplant 气凝胶表现出优异的蒸发速率, 对 MB 水的蒸发速率为 $1.98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 对 MO 水的蒸发速率为 $1.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 对 RhB 水的蒸发速率为 $1.92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。高度多孔结构、PPy 的均匀分布、各种活性基团和温度场效应赋予了 PPy@eggplant 气凝胶令人满意的 Cr^{6+} 吸附能力 ($27.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。PPy@eggplant 气凝胶具有优异的形状回复能力, 这有助于实际应用中的尺寸稳定性。

5.2 展望

本课题成功构建了两种茄子基气凝胶, 并研究了两种气凝胶的性能以及对模拟海水、染料废水、重金属离子废水的光热蒸发性能及其清洁水生产性能。由碳化工艺/原位聚合制备的两种光热转换材料, 同时茄子基气凝胶具备较高的孔隙率, 两种茄子基气凝胶表现出优越、稳定的光热水蒸发性能及其清洁水生产性能。但目前的研究处于发展阶段, 研究结果和实际应用还有一定差距, 仍有一些问题需要考虑和解决。

(1) 茄子基气凝胶可以用水凝胶进行修饰, 提高材料的力学性能, 进一步研究其结合水和自由水之间的中间水所占比例。与纯水相比, 中间水可以通过更少的能量蒸发。凝胶化可以改变凝胶中的水状态以及水相变行为, 降低水蒸发的能量需求, 进而提高蒸发器光热水蒸发性能。

(2) 茄子基气凝胶对重金属离子的再生性能需要进一步研究。例如，通过对所制备的茄子基气凝胶多次吸附和解吸重金属离子，研究其再生性能，评估材料的实际应用价值，以达到材料的长期稳定使用。

(3) 茄子基气凝胶水电联产方面可以进一步探究。已有报道表明，水蒸发过程中，通过温度梯度和离子迁移发电，实现了太阳能界面水蒸发产生清洁水的同时产生一定的电能。

(4) 清洁水生产效率不仅取决于蒸发速率，还取决于蒸发装置冷凝水的收集率。目前太阳能蒸发速率已经突破理论极限速率，但冷凝水的收集技术尚未得到充分发展，严重制约了淡水生产，这方面还需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] 王智弘, 谭雅馨, 苏馨悦, 等. 可持续发展视阈下水资源保护及利用研究综述[J]. 可持续发展, 2024, 14(01): 1-6.
- [2] 裴洪昌, 岳茂文, 刘建路, 等. 海水综合开发与高效利用研究进展[J]. 无机盐工业, 2024, 56 (02): 21-29.
- [3] Zhuang S, Qi H, Wang X, et al. Advances in solar-driven hygroscopic water harvesting[J]. Global Challenges, 2021, 5(1): 2000085.
- [4] Zhao J, Liu Z, Low S C, et al. Electrospinning technique meets solar energy: electrospun nanofiber-based evaporation systems for solar steam generation[J]. Advanced Fiber Materials, 2023, 5(4): 1318-1348.
- [5] Yue Y, Wang Y, Bai Y, et al. A loofah-based all-day-round solar evaporator with phenolic lignin as the light-absorbing material for a highly efficient photothermal conversion[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 477: 147298.
- [6] Zhang J, Zeng B, Li D, et al. Boron nitride-Au (Ag) loaded eggshell membrane with enhanced photothermal property[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 642: 128726.
- [7] Luo W, Zou M M, Luo L, et al. Efficient enhancement of photothermal conversion of polymer-coated phase change materials based on reduced graphene oxide and polyethylene glycol[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 78: 109950.
- [8] Ibrahim I, Seo D H, McDonagh A M, et al. Semiconductor photothermal materials enabling efficient solar steam generation toward desalination and wastewater treatment[J]. Desalination, 2021, 500: 114853.
- [9] Zhu J, Huang L, Bao F, et al. Carbon materials for enhanced photothermal conversion: Preparation and applications on steam generation[J]. Materials Reports: Energy, 2024, 4(2): 100245.
- [10] 孙梦茜, 陈志莉, 陈黎, 等. 太阳能驱动界面蒸发海水淡化技术研究进展[J]. 太阳能学报, 2024, 45 (08): 423-431.
- [11] Duan H, Wang M, Zhang Z, et al. Biomass-derived photothermal carbon aerogel for efficient solar-driven seawater desalination[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(2): 109295.
- [12] Zeng L, Deng D, Zhu L, et al. Biomass photothermal structures with carbonized durian for efficient solar-driven water evaporation[J]. Energy, 2023, 273: 127170.
- [13] Yang Y, Chen N, Feng C, et al. Chromium removal using a magnetic corncob biochar/polypyrrole composite by adsorption combined with reduction: Reaction pathway and contribution degree[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 556: 201-209.
- [14] Liang P, Liu S, Li M, et al. Effective adsorption and removal of Cr (VI) from wastewater using magnetic composites prepared by synergistic effect of polypyrrole and covalent

- organic frameworks[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 336: 126222.
- [15] Gao C, Li Y, Lan L, et al. Bioinspired asymmetric polypyrrole membranes with enhanced photothermal conversion for highly efficient solar evaporation[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(6): 2306833.
- [16] Zhao F, Guo Y, Zhou X, et al. Materials for solar-powered water evaporation[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(5): 388-401.
- [17] Liu G, Xu J, Wang K. Solar water evaporation by black photothermal sheets[J]. *Nano Energy*, 2017, 41: 269-284.
- [18] Schuller J A, Barnard E S, Cai W, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 193-204.
- [19] Neumann O, Urban A S, Day J, et al. Solar vapor generation enabled by nanoparticles[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(1): 42-49.
- [20] 张功煜, 孙凯, 刘元军, 等. 二硫化钼/纳米银@芳纶纳米纤维复合气凝胶的制备及其光热转换性能[J]. *现代纺织技术*, 2025, 33 (02): 33-41.
- [21] Zhou L, Tan Y, Ji D, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation[J]. *Science Advances*, 2016, 2(4): e1501227.
- [22] Fu Y, Zuo H, Liu J, et al. Novel electronic skin based on PPy@PU nonwoven for strain sensing, photothermal and electrothermal applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 369: 115170.
- [23] Li A, Huang M, Hu D, et al. Polydopamine-coated metal-organic framework-based composite phase change materials for photothermal conversion and storage[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2023, 34(8): 107916.
- [24] Wang L, Zhou M, Fu H. An in-situ growth Fe_3O_4 and polyaniline on carbon cloth encapsulated composite phase change materials with high thermal conductivity and photothermal energy conversion and storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 78: 110090.
- [25] Wei Q, Huang J, Meng Q, et al. Open-shell poly (3, 4-dioxythiophene) radical for highly efficient photothermal conversion[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(41): 2406800.
- [26] Zhang L, Tang B, Wu J, et al. Hydrophobic light-to-heat conversion membranes with self-healing ability for interfacial solar heating[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(33): 4889-4894.
- [27] Dao V D, Choi H S. Carbon-based sunlight absorbers in solar-driven steam generation devices[J]. *Global Challenges*, 2018, 2(2): 1700094.
- [28] Zhao F, Zhou X, Shi Y, et al. Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(6): 489-495.
- [29] Zhao Q, Wan Y, Chang F, et al. Photothermal converting polypyrrole/polyurethane composite foams for effective solar desalination[J]. *Desalination*, 2022, 527: 115581.
- [30] 吕博雯, 王福贞, 宋成文, 等. 复合纳米纤维水凝胶的制备及太阳能海水淡化性能[J]. *高校化学工程学报*, 2024, 38 (05): 814-822.
- [31] Wang D, Lin X, Wu Y, et al. Hanging photothermal fabric based on polyaniline/carbon

- nanotubes for efficient solar water evaporation[J]. ACS Omega, 2023, 8(47): 44659-44666.
- [32] Wang J, Gao X, Wang Y, et al. Multifunctional core-double-shell C@ MnO@TiO₂ catalysts with enhanced full-light conversion for the highly efficient photothermal oxidation of toluene[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2022, 317: 121789.
- [33] Zhao L, Guo J, Li S, et al. The development of thermal immunosensing for the detection of food-borne pathogens E. coli O157: H7 based on the novel substoichiometric photothermal conversion materials MoO_{3-x} NPs[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 344: 130306.
- [34] Li W, Feng W, Wu S, et al. Synergy of photothermal effect in integrated 0D Ti₂O₃ nanoparticles/1D carboxylated carbon nanotubes for multifunctional water purification[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 292: 120989.
- [35] Xue Q, Wu W, Wu J Q, et al. Nano-Fe₃O₄/chitosan-based superhydrophobic coatings with magnetic oil-water separation and photothermal conversion properties[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 689: 133698.
- [36] Liu P, Li X Y, Xu L, et al. Recent progress in interfacial photo-vapor conversion technology using metal sulfide-based semiconductor materials[J]. Desalination, 2022, 527: 115532.
- [37] Liu H, Chen C, Wen H, et al. Narrow bandgap semiconductor decorated wood membrane for high-efficiency solar-assisted water purification[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(39): 18839-18846.
- [38] Du Y, Liu P, Zhang H, et al. Nature-inspired structure-engineered TiN/TiO₂ nanotubes array toward solar desalination synergy with photothermal-enhanced degradation and thermoelectric generation[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(10): 2309830.
- [39] Wang Y, He W, Yang R, et al. Dual Plasmons with Bioinspired 3D Network Structure Enabling Ultrahigh Efficient Solar Steam Generation[J]. Nano Letters, 2024, 24(35): 10987-10994.
- [40] Li L, Zhao P, Wang Z, et al. Photothermal Ti₂O₃/polyurethane/polyacrylamide foam with high solar-evaporation efficiency[J]. Desalination, 2023, 567: 117001.
- [41] Zhao Q, Wen H, Wu J, et al. Galactomannan/graphene oxide/Fe₃O₄ hydrogel evaporator for solar water evaporation for synergistic photothermal power generation[J]. Desalination, 2024, 570: 117064.
- [42] Wu M C, Deokar A R, Liao J H, et al. Graphene-based photothermal agent for rapid and effective killing of bacteria[J]. ACS Nano, 2013, 7(2): 1281-1290.
- [43] Zhao X, Meng X, Zou H, et al. Topographic manipulation of graphene oxide by polyaniline nanocone arrays enables high-performance solar-driven water evaporation[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(7): 2209207.
- [44] Thakur A K, Sathyamurthy R, Velraj R, et al. A novel solar absorber using activated carbon nanoparticles synthesized from bio-waste for the performance improvement of solar desalination unit[J]. Desalination, 2022, 527: 115564.
- [45] Murakami T, Nakatsuji H, Inada M, et al. Photodynamic and photothermal effects of semiconducting and metallic-enriched single-walled carbon nanotubes[J]. Journal of the

- American Chemical Society, 2012, 134(43): 17862-17865.
- [46] Han G, Liu Y, Gao J, et al. Local plant-derived carbon sheets as sustainable catalysts for efficient oxygen reduction reaction[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 7(2): 2107-2115.
- [47] 李先锋, 仝奇昆, 王宁. CuS/rGO/PVA 多孔水凝胶的制备及其光热转换性能研究[J]. 山东化工, 2021, 50 (11): 29-32.
- [48] Wu X, Lin D, Zhou H, et al. Salt crystallization on porous asymmetrical graphene oxide-based photothermal hydrogel-fabric unexpectedly enables continuous solar-powered hypersaline water distillation[J]. Carbon, 2025, 233: 119833.
- [49] Mnayan A, Choi M, Kim D H, et al. Cheap, facile, and upscalable activated carbon-based photothermal layers for solar steam generation[J]. RSC Advances, 2020, 10(69): 42432-42440.
- [50] 葛洪宇, 方震华, 姜俊南, 等. 基于碳纳米管的 Janus 太阳能界面蒸发体性能 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2025, 59 (02): 384-393.
- [51] Xu N, Hu X, Xu W, et al. Mushrooms as efficient solar steam-generation devices[J]. Advanced Materials, 2017, 29(28): 1606762.
- [52] Bian Y, Du Q, Tang K, et al. Carbonized bamboos as excellent 3D solar vapor-generation devices[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(4): 1800593.
- [53] Fang J, Liu J, Gu J, et al. Hierarchical porous carbonized lotus seedpods for highly efficient solar steam generation[J]. Chemistry of Materials, 2018, 30(18): 6217-6221.
- [54] Fang Q, Li T, Chen Z, et al. Full biomass-derived solar stills for robust and stable evaporation to collect clean water from various water-bearing media[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(11): 10672-10679.
- [55] Zhu M, Yu J, Ma C, et al. Carbonized daikon for high efficient solar steam generation[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 191: 83-90.
- [56] Liu C, Hong K, Sun X, et al. An ‘antifouling’porous loofah sponge with internal microchannels as solar absorbers and water pumpers for thermal desalination[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(25): 12323-12333.
- [57] Li W, Li F, Zhang D, et al. Porous wood-carbonized solar steam evaporator[J]. Wood Science and Technology, 2021, 55(3): 625-637.
- [58] Li Y, Xu L, Cai J, et al. A stable bilayer polypyrrole-sorghum straw evaporator for efficient solar steam generation and desalination[J]. Advanced Sustainable Systems, 2022, 6(3): 2100342.
- [59] Zhang C, Xiao P, Ni F, et al. Converting pomelo peel into eco-friendly and low-consumption photothermic biomass sponge toward multifunctional solar-to-heat conversion[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(13): 5328-5337.
- [60] Mwinuka P R, Mbilinyi B P, Mbungu W B, et al. Optimizing water and nitrogen application for neglected horticultural species in tropical sub-humid climate areas: A case of African eggplant (*Solanum aethiopicum* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 276: 109756.
- [61] Li W, Chen C, Wang H, et al. Hierarchical porous carbon induced by inherent structure of

- eggplant as sustainable electrode material for high performance supercapacitor[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 1540-1552.
- [62] Li Y, Huang X, Li Y, et al. Shape-stabilized phase-change materials supported by eggplant-derived porous carbon for efficient solar-to-thermal energy conversion and storage[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2020, 4(4): 1764-1772.
- [63] Mohandesi M, Tavakolian M, Rahimpour M R. Eggplant as an appreciable bio-template for green synthesis of NiO nanoparticles: Study of physical and photocatalytic properties[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(16): 22820-22826.
- [64] Liang C, Wang Z. Eggplant-derived SiC aerogels with high-performance electromagnetic wave absorption and thermal insulation properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 373: 598-605.
- [65] Zhu R, Wang D, Zhang J, et al. Biomass eggplant-derived photothermal aerogels with Janus wettability for cost-effective seawater desalination[J]. *Desalination*, 2022, 527: 115585.
- [66] Kong Y, Gao Y, Gao B, et al. Tubular polypyrrole enhanced elastomeric biomass foam as a portable interfacial evaporator for efficient self-desalination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 445: 136701.
- [67] Yana S, Nizar M, Mulyati D. Biomass waste as a renewable energy in developing bio-based economies in Indonesia: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 160: 112268.
- [68] 赵晓玲, 曾丹林, 黄刚, 等. 生物质多孔碳的制备、掺杂及应用[J]. *化工新型材料*, 2023, 51 (07): 49-54.
- [69] 蔡梦洁, 饶俊, 胡亚洁, 等. 生物质多孔碳材料的水热合成及应用研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2023, 57 (02): 79-88.
- [70] Ma J, Fang H, Du L, et al. Efficient photothermal solar water evaporator featuring PI heterogeneous interface via in-situ PPy polymerization[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2025, 199: 108958.
- [71] Li T, Huang Z, Hu M, et al. Highly effective adsorption, porous and charged CAP@UiO-66-NH₂@ PPy hybrid fibrous membrane based on MOFs for Cr (VI) removal from wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025: 161213.
- [72] Li H, Yan Z, Qian Y, et al. Hierarchically structured evaporator with integrated water supply and evaporation layers to retard salt accumulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 185: 122447.
- [73] Zhou J, Gu Y, Liu P, et al. Development and evolution of the system structure for highly efficient solar steam generation from zero to three dimensions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(50): 1903255.
- [74] Tian S, Huang Z, Tan J, et al. Manipulating interfacial charge-transfer absorption of cocrystal absorber for efficient solar seawater desalination and water purification[J]. *ACS Energy Letters*, 2020, 5(8): 2698-2705.
- [75] Gong F F, Li H, Wang W, et al. Scalable, eco-friendly and ultrafast solar steam generators based on one-step melamine-derived carbon sponges toward water purification[J]. *Nano*

- Energy, 2019, 58: 322-330.
- [76] Yang X, Yang Y, Zhu Y. Capillary microflows in porous metals[C]//21st Australasian Fluid Mechanics Conference. 2018.
- [77] Fries N, Odic K, Conrath M, et al. The effect of evaporation on the wicking of liquids into a metallic weave[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 321(1): 118-129.
- [78] 于恒彬. 浅谈地下水资源的可持续开发利用[J]. 水上安全, 2024, (13): 98-100.
- [79] Li R, Zheng S, Wang R, et al. Energy and exergy analyses of a solar PV/T driving hybrid reverse osmosis-thermal distillation system[J]. Solar Energy, 2023, 263: 111985.
- [80] Yadav K, Gudjonsdottir M, Axelsson G, et al. Geothermal-solar integrated multistage flash distillation cogeneration system: A cleaner and sustainable solution[J]. Desalination, 2023, 566: 116897.
- [81] Zhou Z, Cao Y, Anqi A E, et al. Converting a geothermal-driven steam flash cycle into a high-performance polygeneration system by waste heat recovery: 3E analysis and Genetic-Fgoalattain optimization[J]. Renewable Energy, 2022, 186: 609-627.
- [82] Zhang H, Zhang Z, Tong L, et al. Experimental research and model optimization of a novel mechanical vapor compression evaporation system driven by roots steam compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 150: 185-199.
- [83] Sedighi M, Usefi M M B, Ismail A F, et al. Environmental sustainability and ions removal through electrodialysis desalination: Operating conditions and process parameters[J]. Desalination, 2023, 549: 116319.
- [84] Song X , Dong W , Zhang Y ,et al. Coupling solar-driven interfacial evaporation with forward osmosis for continuous water treatment[C]//Exploration. 2022, 2(4): 20220054.
- [85] He F, You H, Liu X, et al. Interfacial-heating solar desalination of high-salinity brine: Recent progress on salt management and water production[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 470: 144332.
- [86] Naghdi B, Heshmati F Z, Mahjoub F, et al. Salt precipitation challenge in floating interfacial solar water desalination systems[J]. Desalination, 2023, 565: 116868.
- [87] Li T, Liu H, Zhao X, et al. Scalable and highly efficient mesoporous wood-based solar steam generation device: localized heat, rapid water transport[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(16): 1707134.
- [88] Zeng L, Deng D, Zhu L, et al. Biomass photothermal structures with carbonized durian for efficient solar-driven water evaporation[J]. Energy, 2023, 273: 127170.
- [89] Sun Y, Zhao Z, Zhao G, et al. High performance carbonized corncob-based 3D solar vapor steam generator enhanced by environmental energy[J]. Carbon, 2021, 179: 337-347.
- [90] Liu Z, Huang X, Miao Y, et al. Eggplant biomass based porous carbon for fast and efficient dye adsorption from wastewater[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 187: 115510.
- [91] Long Y, Huang S, Yi H, et al. Carrot-inspired solar thermal evaporator[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(47): 26911-26916.
- [92] Liu Z, Miao Y, Shi Y, et al. Natural down fiber-reinforced and polypyrrole-modified silk

- p>fibroin composite aerogel for efficient solar steam generation toward seawater desalination and wastewater treatment[J].
- International Journal of Biological Macromolecules*
- , 2024, 257: 128678.
- [93] Liu X, Hou G, Zhao J, et al. Self-interlocked down biomass-based carbon fiber aerogel for highly efficient and stable solar steam generation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142826.
- [94] Wei Z, Wan Z, Cai C, et al. Cellulose-based evaporator with dual boost of water transportation and photothermal conversion for highly solar-driven evaporation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 125018.
- [95] Zhou Z, Gong J, Zhang C, et al. Hierarchically porous carbonized *Pleurotus eryngii* based solar steam generator for efficient wastewater purification[J]. *Renewable Energy*, 2023, 216: 118987.
- [96] Gao M Y, Yang C, Zhang Q B, et al. Electrochemical fabrication of porous Ni-Cu alloy nanosheets with high catalytic activity for hydrogen evolution[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 215: 609-616.
- [97] Liu J, Zhang Y, Zhang L, et al. Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)-derived N-rich graphene with tuneable interlayer distance as a high-rate anode for sodium-ion batteries[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(24): 1901261.
- [98] Li L, Yang Q, Shi Y, et al. Polypyrrole-modified natural eggplant aerogel with high shape recovery for simultaneous efficient clean water generation and heavy metal ion adsorption from wastewater[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 331: 125669.
- [99] Fang J, Liu J, Gu J, et al. Hierarchical porous carbonized lotus seedpods for highly efficient solar steam generation[J]. *Chemistry of Materials*, 2018, 30(18): 6217-6221.
- [100] Lu Y, Wang X, Fan D, et al. Biomass derived Janus solar evaporator for synergic water evaporation and purification[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2020, 25: e00180.
- [101] Yashim M M, Sainorudin M H, Mohammad M, et al. Recent advances on lightweight aerogel as a porous receiver layer for solar thermal technology application[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 228: 111131.
- [102] Kumanek B, Janas D. Thermal conductivity of carbon nanotube networks: A review[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(10): 7397-7427.
- [103] Song C, Zhang B, Hao L, et al. Converting poly (ethylene terephthalate) waste into N-doped porous carbon as CO₂ adsorbent and solar steam generator[J]. *Green Energy & Environment*, 2022, 7(3): 411-422.
- [104] Wang C, Wang J, Li Z, et al. Superhydrophilic porous carbon foam as a self-desalting monolithic solar steam generation device with high energy efficiency[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(19): 9528-9535.
- [105] Yan J, Xiao W, Chen L, et al. Superhydrophilic carbon nanofiber membrane with a hierarchically macro/meso porous structure for high performance solar steam generators[J]. *Desalination*, 2021, 516: 115224.
- [106] Liu J, Liu Q, Ma D, et al. Simultaneously achieving thermal insulation and rapid water

- transport in sugarcane stems for efficient solar steam generation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(15): 9034-9039.
- [107] Menon A K, Haechler I, Kaur S, et al. Enhanced solar evaporation using a photo-thermal umbrella for wastewater management[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(2): 144-151.
- [108] He S, Chen C, Kuang Y, et al. Nature-inspired salt resistant bimodal porous solar evaporator for efficient and stable water desalination[J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(5): 1558-1567.
- [109] Chen X, He S, Falinski M M, et al. Sustainable off-grid desalination of hypersaline waters using Janus wood evaporators[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(10): 5347-5357.
- [110] Zou M, Zhang Y, Cai Z, et al. 3D printing a biomimetic bridge-arch solar evaporator for eliminating salt accumulation with desalination and agricultural applications[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(34): 2102443.
- [111] Wang W, Tian Z, He N, et al. Biomass derived evaporator with highly interconnected structure for eliminating salt accumulation in high-salinity brine[J]. *Desalination*, 2024, 574: 117232.
- [112] Li Y, Wang X, Wu R, et al. Natural multiscale channeled salt resistant solar evaporator for efficient and long-term water desalination[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 206: 117649.
- [113] Li Y, Zhang S, Xia Z, et al. Micro-macro-capillaries fabric-based evaporator for eliminating salt accumulation and highly efficient solar steam generation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 308: 122852.
- [114] Zhang Y, Zhang H, Xiong T, et al. Manipulating unidirectional fluid transportation to drive sustainable solar water extraction and brine-drenching induced energy generation[J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(12): 4891-4902.
- [115] Fan X, Zhang S, Wang H, et al. A facile MXene/PPy modified asymmetry sponge solar absorber enabling efficient and high salt resistance evaporation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 483: 149304.
- [116] Chen K, Cui T, Xue X, et al. Covalently doping polyaniline-based photothermal fabric for continuous recovery of salt and freshwater from seawater via solar-driven interfacial evaporation[J]. *Desalination*, 2024, 580: 117527.
- [117] Dong X, Si Y, Chen C, et al. Reed leaves inspired silica nanofibrous aerogels with parallel-arranged vessels for salt-resistant solar desalination[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(7): 12256-12266.
- [118] Wang C, Wang Y, Yan M, et al. Highly efficient self-floating jellyfish-like solar steam generators based on the partially carbonized Enteromorpha aerogel[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 630: 297-305.
- [119] Yang Y, Zhao H, Yin Z, et al. A general salt-resistant hydrophilic/hydrophobic nanoporous double layer design for efficient and stable solar water evaporation distillation[J]. *Materials Horizons*, 2018, 5(6): 1143-1150.
- [120] Yin X, Zhang Y, Guo Q, et al. Macroporous double-network hydrogel for

- high-efficiency solar steam generation under 1 sun illumination[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(13): 10998-11007.
- [121] Zhao P, Xu J, Li J, et al. Biomimetic solar evaporator for continuous clean water production with synergistic organic dye wastewater remediation[J]. *Desalination*, 2024, 586: 117819.
- [122] Wu P, Wu X, Wang Y, et al. A biomimetic interfacial solar evaporator for heavy metal soil remediation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 435: 134793.
- [123] Xue T, Yang F, Zhao X, et al. Portable solar interfacial evaporator based on polyimide nanofiber aerogel for efficient desalination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 461: 141909.
- [124] Hou X, Sun H, Dong F, et al. 3D carbonized grooved straw with efficient evaporation and salt resistance for solar steam generation[J]. *Chemosphere*, 2023, 315: 137732.
- [125] Yu J, Yun J, Zang S, et al. Hydrogel fiber fabric combining rapid water transport, thermal localization, and large-scale production for ultra-high salt-resistant solar desalination[J]. *Nano Energy*, 2023, 117: 108847.
- [126] 吴宝程, 廖全兴. 多孔碳材料的制备及未来研究方向[J]. *化纤与纺织技术*, 2024, 53 (12): 17-19.
- [127] 郭祥坤, 许银超, 沙力争, 等. 生物质基碳材料用于海水淡化的研究进展[J]. *中国造纸*, 2024, 43 (09): 47-55.
- [128] 景欣欣, 王伟铎, 莫何苏, 等. 光热材料在太阳能海水脱盐中应用的研究进展[J]. *无机化学学报*, 2024, 40 (06): 1033-1064.
- [129] 李璟孜, 娄蒙蒙, 黄世燕, 等. 基于光热利用的金属有机骨架/石墨烯复合膜对印染废水的再生处理[J]. *纺织学报*, 2023, 44 (09): 116-123.
- [130] Wang Z, Wu X, He F, et al. Confinement capillarity of thin coating for boosting solar-driven water evaporation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(22): 2011114.
- [131] Li Y, Hong W, Li H, et al. Solar absorber with tunable porosity to control the water supply velocity to accelerate water evaporation[J]. *Desalination*, 2021, 511: 115113.
- [132] Liu Z, Gao B, Huang X, et al. Scale-up fabrication of PVDF-HFP nanofibrous membrane with unique surface properties for efficient separation of oil from water[J]. *Textile Research Journal*, 2022, 92(11-12): 1830-1842.
- [133] Raghunathan S P, Narayanan S, Poulouse A C, et al. Flexible regenerated cellulose/polypyrrole composite films with enhanced dielectric properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 157: 1024-1032.
- [134] Wang F, Kim H J, Park S, et al. Bendable and flexible supercapacitor based on polypyrrole-coated bacterial cellulose core-shell composite network[J]. *Composites Science and Technology*, 2016, 128: 33-40.
- [135] Omastová M, Trchová M, Kovářová J, et al. Synthesis and structural study of polypyrroles prepared in the presence of surfactants[J]. *Synthetic Metals*, 2003, 138(3): 447-455.
- [136] Shao Y, Fan Z, Zhong M, et al. Polypyrrole/bacterial cellulose nanofiber composites for

- hr/>
- hexavalent chromium removal[J]. *Cellulose*, 2021, 28: 2229-2240.
- [137] Muller D, Rambo C R, Porto L M, et al. Structure and properties of polypyrrole/bacterial cellulose nanocomposites[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 94(1): 655-662.
- [138] Kelly F M, Johnston J H, Borrmann T, et al. Functionalised hybrid materials of conducting polymers with individual fibres of cellulose[J]. *Chemistry Europe*, 2007, 35, 5571-5577.
- [139] Tabačiarová J, Mičušík M, Fedorko P, et al. Study of polypyrrole aging by XPS, FTIR and conductivity measurements[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, 120: 392-401.
- [140] Xue N, Cui H, Dong W, et al. Multifunctional hydrophilic MXene/Gelatin composite aerogel with vertically aligned channels for efficient sustainable solar water evaporation and Oil/Water separation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140614.
- [141] Yashim M M, Sainorudin M H, Mohammad M, et al. Recent advances on lightweight aerogel as a porous receiver layer for solar thermal technology application[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 228: 111131.
- [142] Gao T, Wu X, Wang Y, et al. A hollow and compressible 3D photothermal evaporator for highly efficient solar steam generation without energy loss[J]. *Solar RRL*, 2021, 5(5): 2100053.
- [143] Mei T, Zhao Q, Chen J, et al. Nanofiber-based aerogel integrating photothermal and photocatalytic properties for efficient wastewater treatment[J]. *Composites Communications*, 2022, 35: 101348.
- [144] Liu X, Tian Y, Chen F, et al. An efficient and scalable strategy for ultrablack-paint-enabled solar-driven steam generation[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 234: 111436.
- [145] Wang Y, Wu X, Wu P, et al. Enhancing solar steam generation using a highly thermally conductive evaporator support[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(24): 2479-2488.
- [146] Jiang J, Jiang H, Xu Y, et al. Janus Co@C/NCNT photothermal membrane with multiple optical absorption for highly efficient solar water evaporation and wastewater purification[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 647: 128960.
- [147] Zhang B, Wong P W, An A K. Photothermally enabled MXene hydrogel membrane with integrated solar-driven evaporation and photodegradation for efficient water purification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 133054.
- [148] Liu Z, Gao B, Miao Y, et al. Silk fibroin/carbon nanofiber composite aerogel for efficient and stable solar steam generation[J]. *Composites Communications*, 2022, 36: 101358.
- [149] Li S, He Y, Guan Y, et al. Cellulose nanofibril-stabilized pickering emulsion and in situ polymerization lead to hybrid aerogel for high-efficiency solar steam generation[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2020, 2(11): 4581-4591.
- [150] Peng F, Xu J, Bai X, et al. A janus solar evaporator with 2D water path for highly efficient salt-resisting solar steam generation[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*,

- 2021, 221: 110910.
- [151] Jiang Y, An N, Sun Q, et al. Biomass hydrogels combined with carbon nanotubes for water purification via efficient and continuous solar-driven steam generation[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: 155757.
- [152] Wu Y, Shen L, Zhang C, et al. Polyacid doping-enabled efficient solar evaporation of polypyrrole hydrogel[J]. *Desalination*, 2021, 505: 114766.
- [153] Wang X, Zhang L, Zheng D, et al. A polyelectrolyte hydrogel coated loofah sponge evaporator based on Donnan effect for highly efficient solar-driven desalination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 462: 142265.
- [154] Gong L, Li C, Wei N, et al. Highly efficient solar evaporator based on Graphene/MoO_{3-x} coated porous nickel for water purification[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 275: 119139.
- [155] Han J, Dong Z, Hao L, et al. Poly (ionic liquid)-crosslinked graphene oxide/carbon nanotube membranes as efficient solar steam generators[J]. *Green Energy & Environment*, 2023, 8(1): 151-162.
- [156] Cui T, Cai W, Chu F, et al. Enhanced light trapping effect of hierarchical structure assembled from flower-like cobalt tetroxide and 3D-printed structure for efficient solar evaporation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 139102.
- [157] Wang L, Gao P, Liu M, et al. The fabrication of monodisperse polypyrrole/SBA-15 composite for the selective removal of Cr (VI) from aqueous solutions[J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45(18): 8125-8135.
- [158] Li Y, Lan L, Zhou F, et al. Flexible and easy-handling pristine polypyrrole membranes with bayberry-like vesicle structure for enhanced Cr (VI) removal from aqueous solution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 439: 129598.
- [159] Mehrkhah R, Goharshadi E K, Ghafurian M M, et al. Clean water production by non-noble metal/reduced graphene oxide nanocomposite coated on wood: scalable interfacial solar steam generation and heavy metal sorption[J]. *Solar Energy*, 2021, 224: 440-454.
- [160] Hou Q, Zhou H, Zhang W, et al. Boosting adsorption of heavy metal ions in wastewater through solar-driven interfacial evaporation of chemically-treated carbonized wood[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 144317.
- [161] Cao F, Sun Y, Zhang L, et al. High efficient adsorption accompanied by in-situ reduction of Cr (VI) removal by rice straw fiber ball coated with polypyrrole[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 575: 151583.
- [162] Kumar R, Raizada P, Ahamad T, et al. Polypyrrole-based nanomaterials: a novel strategy for reducing toxic chemicals and others related to environmental sustainability applications[J]. *Chemosphere*, 2022, 303: 134993.
- [163] Medykowska M, Wiśniewska M, Szewczuk-Karpisz K, et al. Interaction mechanism of heavy metal ions with the nanostructured zeolites surface-adsorption, electrokinetic and XPS studies[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 357: 119144.

攻读硕士学位期间取得的科研成果

发表的学术论文

- [1] **Lele Li**, Qinqin Yang, Xianhong Zheng, Lei Zhou, Siew Chun Low, Jianghui Zhao*, Zhi Liu*. Ultra-high salt-resistant eggplant carbon evaporator: Evaporation performance and salt-resistance mechanism.[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 368, 132974. (第三章)
- [2] **Lele Li**, Qinqin Yang, Yiling Shi, Lei Zhou, Wei Li, Jianghui Zhao*, Zhi Liu*. Polypyrrole-modified natural eggplant aerogel with high shape recovery for simultaneous efficient clean water generation and heavy metal ion adsorption from wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 331: 125669. (第四章)
- [3] Yiling Shi, **Lele Li**, Jianghui Zhao*, Xianhong Zheng, Zihao Feng, Jianying Huang, Zhi Liu*, and Yuekun Lai*. All-biomass tough aerogel fiber for super thermal insulating textile[J]. Energy & Environmental Materials, 2025, 0, e70046.
- [4] Jianghui Zhao, Wanlong Li, **Lele Li**, Quan Feng, Siew Chun Low, Soon Huat Tan*, Zhi Liu*. Biomimetic Ag-modified core-shell nanofibrous membrane with enhanced solar absorption and water replenishment for efficient clean water production and antibacterial activity[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354: 129084.
- [5] Yiling Shi, Yi Miao, **Lele Li**, Wei Li, Xianhong Zheng, Jianghui Zhao*, Zhi Liu*. Efficient thermal insulation through all-biomass silk fibroin composite aerogel 3D-reinforced by natural down-fiber[J]. Materials Today Physics, 2024, 40: 101323.

获奖情况

研究生期间获得研究生国家奖学金、省级优秀毕业生、校级优秀毕业生、优秀学生干部、优秀青年志愿者、学生社区党建标兵等荣誉。

《生物质光驱动蒸发器清洁水生产及协同重金属离子吸附》，第五届全国大学生绿色染整科技创新竞赛获二等奖，2024. 6。

致 谢

时光荏苒，研究生阶段的学习生活即将画上句号。回首这段充满挑战与成长的旅程，我心中充满了感激之情。在此，我谨向所有在我求学路上给予帮助和支持的人致以最诚挚的谢意。

首先，我要衷心感谢我的导师刘志老师。您的耐心指导和细致批阅让我豁然开朗，不仅帮助我克服了研究中的诸多困难，也让我学会了如何以更科学、更严谨的方式思考问题。您对生活的态度，指导学生的方式，与人的相处模式，值得传颂，令人称赞。同时，还要感谢赵老师对论文数据的处理、配色、制图的悉心指导，两位良师无私的帮助，亦师亦友，使我受益匪浅。

其次，由衷感谢这个大家庭——导师刘志、师娘赵江惠；2020 届师兄高冰、师兄黄孝海、师兄侯广开；2021 届师兄缪伟；2022 届李乐乐、时义玲、杨钦钦；2023 届师妹李皖龙；2024 届师妹胡小蝶。在研究生期间，我们一起讨论问题、分享心得，共同度过了许多难忘的时光。实验室的团结协作精神和积极向上的氛围让我倍感温暖。望我们继续前行，回头看，齐聚一堂，欢声笑语。

最后，我想说，感谢相遇的人，感谢善良的人，感谢公平的人，感谢幸运的人，感谢陪同健身的人，感谢援助之手的人，感谢陪同吃饭的人。感谢我的父母给予我生命，让我感受世界的美好。感谢幸运的自己，一步一脚印，一步一美景。

研究生生涯的结束，又是一个新的起点。前途漫漫，何处不是家。