

太阳能驱动界面蒸发技术：材料设计、性能调控与抗盐机制研究进展

孟庆莹^{1*}, 郭志伟², 刘小杰², 宋兆焕^{1#}, 刘宏基¹

¹河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2026年5月9日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月17日

摘要

全球淡水资源短缺与水质型缺水问题日益突出, 已成为制约全球可持续发展的关键因素之一。传统海水淡化技术普遍存在能耗高、碳排放强度大等短板, 难以满足偏远无电网地区的稳定淡水供给需求。太阳能驱动界面蒸发技术凭借高光热转换效率、低碳环保、运行成本低等显著优势, 已成为海水淡化与水处理领域的前沿研究热点。本文系统阐述了太阳能驱动界面蒸发技术的基本原理, 从光热转换材料、基体材料、热管理与水输运调控、抗盐机制四个角度梳理了该领域国内外最新研究进展, 对比明确了不同材料体系与结构设计性能差异与特点。

关键词

太阳能驱动界面蒸发, 光热转换材料, 热局域化, 抗盐机制

Research Progress on Solar-Driven Interfacial Evaporation Technology: Material Design, Performance Regulation and Salt Resistance Mechanism

Qingying Meng^{1*}, Zhiwei Guo², Xiaojie Liu², Zhaohuan Song^{1#}, Hongji Liu¹

¹School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 孟庆莹, 郭志伟, 刘小杰, 宋兆焕, 刘宏基. 太阳能驱动界面蒸发技术: 材料设计、性能调控与抗盐机制研究进展[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 47-55. DOI: 10.12677/ms.2026.166137

Abstract

The global shortage of freshwater resources and water quality-induced water scarcity are growing increasingly prominent, and have emerged as one of the key constraints to global sustainable development. Conventional seawater desalination technologies are generally plagued by inherent drawbacks including high energy consumption and high carbon emission intensity, rendering them unable to meet the demand for stable freshwater supply in remote off-grid areas. With its outstanding advantages of high photothermal conversion efficiency, low-carbon eco-friendliness, and low operating cost, solar-driven interfacial evaporation (SDIE) technology has become a cutting-edge research focus in the field of seawater desalination and water treatment. This paper systematically elaborates the fundamental principles of SDIE technology. From the four core dimensions of photothermal conversion materials, matrix materials, thermal management and water transport regulation, as well as salt resistance mechanisms, it reviews and analyzes the latest domestic and international research progress in this field, and compares and clarifies the performance differences, advantages and limitations of various material systems and structural designs.

Keywords

Solar-Driven Interfacial Evaporation, Photothermal Conversion Materials, Thermal Localization, Salt Resistance Mechanism

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

淡水资源可持续利用是人类社会发展的基石，全球可直接利用的淡水资源不足总水量 1% [1]，叠加气候变化与水污染的影响，淡水短缺已严重制约全球发展。海水淡化是应对淡水危机的有效方案，主流热法与膜法技术虽已成熟，但仍存在高能耗、高碳排放等固有缺陷，难以在偏远、能源匮乏地区推广应用。

2. 太阳能驱动界面蒸发技术发展现状

界面加热型太阳能蒸发技术凭借高能源效率与低能耗特点，成为水处理领域的研究热点。该技术将太阳能转换的热能局域在气液界面的薄水层中，仅对界面水分子局部加热汽化，避免了整体加热水体的巨大能量损耗。太阳能驱动水蒸发技术可分为底部加热型、体积加热型和界面加热型[2]。其中底部加热型热损失大，蒸发效率仅 30%~45%。体积加热型借助纳米流体将热源置于水体内部，效率略有提升，但长期稳定性差；界面加热型通过界面热局域化将效率提升至约 90% [3]，实现了能量的高效利用。

典型的界面太阳能蒸发系统主要由顶部光吸收层、中间水传输层、底部支撑隔热层及蒸汽冷凝收集装置构成[4]。光吸收层负责宽谱太阳光吸收与热转换，兼具多孔结构保障水蒸气逸出；输水层为多孔亲水材料，通过毛细作用向光热层持续供水；底部隔热支撑层采用低密度、低导热材料，可阻断热能向水体耗散，同时维持系统水面漂浮。系统工作时，光热层将太阳能转化为热能局域于界面薄水层，使水汽化后冷凝产水，输水层持续补充水体，形成高效稳定的海水淡化循环。

界面太阳能蒸发系统的性能主要取决于光热转换、输水控盐、隔热保温等功能模块的协同设计。下文将围绕系统的组成,依次阐述光热层材料、基体层输水与隔热功能、抗盐结构设计与机制。

2.1. 光热转换材料

光热转换材料是一种可以高效吸收太阳能并将其转换为热量的粉末状物质。太阳光谱主要涵盖紫外区(300~400 nm)、可见区(400~700 nm)及近红外区(700~2500 nm)。因此理想的光热材料需具备宽谱强吸收特性,以最大限度实现光热转换。目前广泛研究的光热材料主要包括碳基材料、等离激元金属材料 and 半导体材料三大类。

碳基材料具有黑色外观,凭借天然宽带光吸收能力,成为光热材料的研究重点。石墨、碳点等经典碳基材料均已被证实具备优异的光热性能。如 Li 等人[5]设计的石墨烯包覆的二氧化硅框架,在 200~2500 nm 范围内实现了对太阳光的 95.0%~99.0%高吸收率。此外,聚吡咯(PPy)、碳化天然木材等改性高分子及生物质衍生碳基材料,因低成本、环保易加工的优势,也成为界面蒸发系统的理想光热材料选择[6]。等离激元金属材料因高载流子浓度具备高效光热转换能力,Au、Ag、Al 等常见金属在可见光区可产生等离子体共振效应[7]。部分半导体纳米材料也可通过掺杂、相变等方式调节载流子浓度,展现出显著的局域表面等离子体共振效应[8]。

光热转换材料的光吸收性能,既取决于材料自身的本征吸光特性,也可通过微结构设计显著优化。如碳基材料通过构建对齐、多孔或层状等微结构,促进入射光多次反射散射,降低光损失。当微结构尺寸与入射光波长匹配时,可进一步提升光吸收效率[9]。此外,将多孔结构与功能组分的空间分布结合,可以达到协同优化光热转换、水传输与盐分管理的效果[10]。类似地,等离激元金属材料可通过不同尺寸纳米粒子的多孔组装,利用等离子体共振模式的重叠杂化拓宽吸收带宽。半导体材料,如 TiN、双金属氧化物等同样可以通过如纳米丝/网/森林[11]、多级介孔[12]等微纳结构设计,增强光吸收并拓宽吸收波段。

表 1 总结了不同光热材料在吸收光谱、光热转换效率、成本、稳定性等方面的优缺点。

Table 1. Comparison of characteristics of carbon-based, plasmonic metal, and semiconductor photothermal materials

表 1. 碳基、等离激元金属及半导体光热材料特性对比

光热材料	吸收光谱	光热效率	材料成本	综合稳定性
碳基材料	全光谱宽带吸收 (200~2500 nm)	高(80%~100%)	极低(原料易得)	优异(耐酸碱/盐/高温)
等离激元金属材料	特定波长共振吸收, 近红外覆盖不足	中低(65%~85%) 单一组分效率低	极高(Au/Ag 昂贵, 纳米化成本高)	较差(易被盐/腐蚀介质 损坏,高温易氧化)
半导体材料	宽谱吸收,覆盖 紫外-近红外	较高(75%~95%)	中等	中等(化学稳定性强, 耐盐)

2.2. 基体材料

在界面太阳能蒸发系统中,基体材料承担系统悬浮支撑、向光热层输水、向下隔热的作用,因此理想的基体材料需具备轻质、多孔、低导热、良好机械稳定性等特点,目前水凝胶、气凝胶和天然生物材料等多孔材料是研究热点。

2.2.1. 水凝胶材料

水凝胶是富含网络结构的聚合物材料,骨架亲水基团可通过氢键结合并储存大量水分。水凝胶的内部还具有贯通的多孔微通道结构,可将水分快速输运至蒸发界面进行局部加热[13]。水凝胶内部的水分可

分为自由水、中间水与结合水三种状态，其中中间水与聚合物网络相互作用较弱，蒸发焓显著降低，可实现更快速的水相变与蒸汽逸出[14]。

水凝胶本身无光热转换功能，常通过原位聚合等方式将光热材料掺杂于水凝胶网络中，实现光热驱动水蒸发。例如，Du 等人[15]构建的梯度复合水凝胶，上层为碳纳米管掺杂的光热层，下层为亲水共聚合物输水层，在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (1 sun) 下的蒸发率可达 $2.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，光热转换效率 92.22%；Li 等人[16]将 PPy 光热材料掺杂于水凝胶网络中以实现光热驱动水蒸发，制备的 PPy 复合纳米纤维水凝胶孔隙率超 90%，在 20 wt% 高盐水中仍保持 $2.85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率，充分体现了水凝胶基体在输水、隔热方面的优势。

除光热材料掺杂外，还可通过材料组成设计调控水合状态提升性能。聚两性离子水凝胶因反聚电解质效应，在高盐环境中可形成更高水合度的聚合物网络，显著提升“中间水”比例以降低蒸发焓。如 Lei 等人[17]开发的聚两性离子水凝胶，在 10 wt% 的盐水中可以达到 $4.14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高蒸发速率。这证明了利用化学组成设计来调控水合状态，从而降低蒸发焓的方法是可行的。

另外也可以通过水凝胶的内部结构设计进一步提高水凝胶的界面蒸发性能。模板法是制备内部多孔结构的常用方法。Ruan 等人[18]用可水溶解的 NaCl 作模板，在 PVDF 基体中加入炭黑作为光热材料，通过热压和溶解 NaCl 的过程制备出具有开孔结构的 CB-HP 蒸发器，其致密的孔道显著提升了光吸收和水分输运性能。Zhou 等人[19]则采用径向冷冻形成冰晶模板，制备了模仿植物的垂直排列孔道的两性离子凝胶基蒸发器，该蒸发器的水传输速率达到 $3.8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ，较随机孔结构提升近百倍，展现出定向孔道对输水性能的显著优化作用。

2.2.2. 气凝胶材料

气凝胶因低导热系数、高孔隙率与三维多孔结构，已成为界面太阳能蒸发系统的热门基体材料。设计具有垂直或径向排列通道的气凝胶既能显著降低水传输阻力，也可为盐分回流提供路径。如 Zhao 等人[20]受树木根部输水结构的启发，制备了带扇形壁与自下而上渐缩锥形通道的气凝胶，其梯度通道可产生强毛细力加速水分向上输运，同时具备更优的盐分扩散与回流能力，在 20 wt% NaCl 溶液中可维持 8 h 的 $1.94 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 稳定的蒸发速率。

除结构设计外，功能复合和表面工程也是提高气凝胶性能的重要方法。Wang 等人[21]利用聚吡咯掺杂二氧化硅，复合海藻酸钠制备出 PPy/SiO₂-SA 气凝胶，其三维贯通的网络具有高强度，光热转换效率达到 94.17%。Ren 团队[22]制备出了 Janus 型 PPy/聚酰亚胺(PI)气凝胶，经碳纳米管表面修饰构建不对称润湿结构，在 1 sun 下蒸发速率达 $2.43 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，同时具备良好的抗盐和自清洁能力。

2.2.3. 其他材料

生物质材料因多孔结构、成本低廉、易修饰光热材料等优势也得到广泛研究。例如，Pang 等人[23]利用木材天然孔隙与超疏水表面构建悬浮蒸发系统，通过诱导热对流降低热损失，表面温度稳定在 49.4°C ，实现了 $1.63 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发率。Zhu 团队[24]则基于炭化茄子基底、Fe³⁺-单宁酸光热层，制备了带定向二维水通道的气凝胶蒸发器，蒸发速率可达 $1.61 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

泡沫材料因低导热系数，常被用作隔热层以强化热局域化效果。如 Wu 课题组[25]采用聚苯乙烯与纤维素海绵构建隔热系统，热稳定性显著提高。Ma 团队[26]研发的板锥式蒸发器，以 GO-碳纤维薄膜为光热层，通过减小薄膜与基底的接触面积抑制热传导，使蒸发器表面温差达 22.7°C 。这些研究表明，生物质与泡沫材料经合理的结构与功能复合，可成为高效低成本的太阳能驱动水蒸发系统材料。

2.3. 热管理与水运输

热管理的目的是将光热转换产生的热量最大限度局域在蒸发界面以驱动水相变，水运输则需保障蒸

发界面持续稳定供水,同时协助界面高浓度盐分向下方水体扩散,二者的协同设计是优化太阳能蒸发系统整体性能的关键。

热局域化旨在最小化向下方水体的热传导、热对流与热辐射损失。蒸发器直接置于水面时,热量易通过水体传导散失[27]。为此研究者开发了多种隔热策略,如非接触式设计通过空气间隙将光吸收层与水面分离,利用热辐射加热水体,避免直接热传导并防止表面盐污[28];悬挂式、拱桥式等构型则通过减少光热层与水体的大面积接触阻断热传导路径[29]。此外,采用低导热系数泡沫材料(如聚苯乙烯,导热系数 $0.03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)作为隔热层,也是减少热传导损失的有效方法。

水运输通道设计需与热局域化策略适配,在最小化热损失的同时满足蒸发耗水需求。水通道可分为一维、二维与三维:一维通道(棉线、植物茎秆等)可实现定向输水,路径清晰且热传导距离短,如基于棉棒伞状输水结构的蒸发器实现了 85% 的太阳能蒸汽效率[30]。二维通道(亲水织物、薄膜等)可增大润湿面积,实现均匀供水;三维通道(仿植物导管的垂直多孔木材、竹子等)可提供更丰富的输水路径与良好的隔热性能[31]。

值得注意的是,Janus 结构蒸发器可同时实现高效隔盐隔热与蒸发界面稳定供水[32]。这类蒸发器通常由疏水层与亲水层上下复合而成。如静电纺丝制备的疏水 CB@PMMA/亲水 PAN Janus 膜,在 20 wt% NaCl 盐水中表现出极强的抗盐能力和结构稳定性[33]。此外,由三聚氰胺泡沫顶部改性为疏水光热层和底部保持亲水的 Janus 结构也实现了 $1.38 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的稳定蒸发和长期抗盐性能[34]。

3. 太阳能驱动界面蒸发系统的脱盐机制

太阳能驱动界面蒸发技术的实际应用,普遍面临蒸发界面盐分持续沉积结晶的难题[35]。盐结晶会堵塞蒸汽逸出通道,影响系统长期运行稳定性。为此,研究者开发了盐分定向迁移、Janus 结构设计、自移动结构构建、Donnan 效应利用等抗盐策略,目的是通过引导盐分定向迁移或实现结晶原位清除,以下分别阐述各类策略的作用机理与典型设计。

3.1. 盐分定向迁移

太阳能界面蒸发过程中,蒸发器表面盐度随水分蒸发持续升高,极易引发盐晶析出聚集;而非光照阶段蒸发暂停时,高浓度盐水会在重力作用下沉降,与下层低盐水体对流混合,界面盐分可借助浓度梯度的扩散效应重新溶入主体水体,显著提升系统自排盐能力[11]。

通过设计微纳通道与梯度结构,可结合毛细力与浓度梯度实现盐离子定向回流。如 Xiao 等人[36] 3D 打印的仿生莲子结构水凝胶蒸发器,在 25 wt% 高盐环境中可维持 $1.889 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 稳定的蒸发率,其垂直微通道驱动离子定向回流,花瓣状拓扑结构可将盐结晶引导至非蒸发区。Wen 等人制备的径向-垂直异质水凝胶,凭借垂直通道加速供水、径向结构实现热局域化,异质界面诱导的层流对流促进盐离子横向迁移,在 20 wt% 盐水中运行 12 h 后仍保持 $3.98 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高蒸发率且几乎无结晶[37]。

3.2. Janus 结构

具有非对称润湿特性的 Janus 结构蒸发器,因优异的抗盐结晶能力成为近年研究热点。该类蒸发器上下表面润湿性相反,底部亲水层通过毛细效应持续向蒸发界面输水,顶部疏水层在完成光热转换的同时,可有效阻隔盐分在表面结晶;这种水分输运与蒸汽产生的空间分离设计,使其在高盐水中仍能维持长期稳定的蒸发性能[38]。

例如 Li 等人[39]设计的双层 Janus 蒸发器,上表面超疏水涂层阻隔盐水防盐沉积,下表面亲水基底实现持续输水与盐水回流,在 3.5 wt% NaCl 溶液中蒸发率达 $2.72 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,在 20 wt% 高盐条件下仍能保持 $1.51 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的稳定性能;Zhang 等人[40]则设计了一种具有内亲水、外疏水的 Janus 蒸发器,在

真实海水测试中的蒸发率达到 $1.743 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ；Qu 等人[41]结合多孔结构设计了一种由超疏水铜泡沫和亲水光热层构成的 Janus 中空蒸发器。该蒸发器在 15 wt% NaCl 中运行 10 h 后实现了零盐积累。尽管 Janus 结构在抗盐方面表现优异，但其制备常涉及多层组装与表面修饰，复杂的工艺和较高的成本限制了其大规模应用。

3.3. 自移动结构

自移动结构蒸发器的除盐机制是利用盐沉积导致的重心或力矩变化，触发自生周期性运动，使析出盐晶重新溶解并回流至主体水体，通过自清洁过程避免表面盐堆积，维持蒸发界面高效稳定运行。

典型的设计包括滚筒式、球形式等结构。如 Jiang 等人[42]受水车启发开发的滚筒结构蒸发器，侧面同步完成蒸汽释放与盐沉积，盐积累改变质量分布时，浮力与重力失衡触发滚筒旋转，实现盐分脱落溶解，在 5~20 wt% 的宽盐度范围内的蒸发率为 $3.142 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。Wu 等人[43]设计的轻质聚苯乙烯球形蒸发器，质量灵敏度与抗盐响应性极强，仅需不足 15 mg 的盐沉积重量变化即可触发球体旋转。尽管自移动结构具备良好的自清洁抗盐能力，但实际应用中，水流波动、风浪等环境因素会影响其运动响应及时性，更适用于相对平静的水体环境。

3.4. Donnan 效应

除物理结构调控外，利用界面电化学性质实现离子选择性排斥也是重要的抗盐路径，其中 Donnan 效应发挥了关键的作用。该效应的原理是固定电荷基团在材料界面处形成的离子化电负性屏障，可选择性地阻碍同号离子(如 Cl^-)的迁移，在界面处建立起排盐的化学势垒。

如 Wang 等人[44]以天然丝瓜络海绵为基底，负载聚丙烯酸钠水凝胶制备的带负电聚电解质复合蒸发器，借助水凝胶中丰富的 $-\text{COO}^-$ 基团限制 Na^+ 的扩散。在 $200 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的盐度范围内，蒸发速率始终维持在 $1.45 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上；He 等人[45]将磷酸根 ($-\text{SO}_3^-$) 接枝到聚丙烯酰胺网络上制备的带负电荷的水凝胶，其界面固定负电荷形成的 Donnan 屏障能显著阻碍 Cl^- 迁移，24 h 离子渗透率仅为未改性体系的 50%。此外分子动力学模拟进一步表明，具有高电势的界面(如海藻酸盐水凝胶中电离的羧基)可以有效选择性阻碍阴离子扩散，同时允许阳离子迁移从而形成协同的离子排斥能垒，从微观角度来调控盐分输运[46]。

表 2 总结了不同耐盐结构的适用盐度范围、复杂程度及长期有效性。

Table 2. Applicability, complexity and long-term effectiveness of salt-resistant structures

表 2. 不同耐盐结构的适用盐度范围、复杂程度及长期有效性

脱盐机制类型	适用盐度范围	制备复杂度	长期有效性
盐分定向迁移	0~25 wt%	中等(需设计微纳通道/梯度结构)	中等(长期运行易出现局部盐结晶)
Janus 结构	0~20 wt%	高(需多层组装 + 不对称表面修饰, 界面结合要求高)	中等(疏水层易污染反转, 层间易脱落)
自移动结构	0~20 wt%	中高(需精密设计重心平衡, 运动部件易磨损)	中低(易受水流风浪干扰)
Donnan 效应	10~15 wt%	低中等(仅需聚电解质接枝/复合, 工艺相对简单)	中高(交联后聚电解质基团稳定性提升)

4. 结语

本文围绕高性能太阳能驱动界面蒸发系统，系统梳理了光热转换材料体系、基体材料选择、热管理

与水输运优化策略, 以及主流抗盐机制的国内外研究进展。尽管该技术在实验室层面已取得显著突破, 但从基础研究走向规模化工程应用, 仍面临复杂动态环境下长期运行稳定性不足、高性能复杂结构与低成本规模化制造的矛盾突出、单一产水功能难以匹配多元应用需求等关键挑战。未来该领域将聚焦工程化导向的低成本材料与工艺创新, 结合数值模拟与机器学习构建多场耦合理论模型、实现蒸发器的理性设计, 打造产水-净化-发电-盐回收多功能集成系统, 研发自适应结构并建立标准化评价体系, 通过多学科交叉融合加速技术落地, 为解决全球淡水短缺问题提供技术支撑。

致 谢

衷心感谢宋兆焕老师在本论文研究与撰写过程中给予的指导, 同时向本文所引用文献的所有原作者致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1] Goh, P.S., Liang, Y.Y. and Ismail, A.F. (2021) Energy Efficient Seawater Desalination: Strategies and Opportunities. *Energy Technology*, **9**, Article ID: 2100008. <https://doi.org/10.1002/ente.202100008>
- [2] Wang, Y., Huang, W., Guo, S., Xin, X., Zhang, Y., Guo, P., *et al.* (2021) Sulfur-Deficient ZnIn₂S₄/Oxygen-Deficient WO₃ Hybrids with Carbon Layer Bridges as a Novel Photothermal/Photocatalytic Integrated System for Z-Scheme Overall Water Splitting. *Advanced Energy Materials*, **11**, Article ID: 2102452. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102452>
- [3] Tao, P., Ni, G., Song, C., Shang, W., Wu, J., Zhu, J., *et al.* (2018) Solar-Driven Interfacial Evaporation. *Nature Energy*, **3**, 1031-1041. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0260-7>
- [4] Mao, K., Zhang, Y. and Tan, S.C. (2025) Functionalizing Solar-Driven Steam Generation Towards Water and Energy Sustainability. *Nature Water*, **3**, 144-156. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00363-x>
- [5] Li, L. and Zhang, J. (2021) Highly Salt-Resistant and All-Weather Solar-Driven Interfacial Evaporators with Photothermal and Electrothermal Effects Based on Janus Graphene@silicone Sponges. *Nano Energy*, **81**, Article ID: 105682. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105682>
- [6] Dang, C., Wang, H., Cao, Y., Shen, J., Zhang, J., Lv, L., *et al.* (2022) Ultra Salt-Resistant Solar Desalination System via Large-Scale Easy Assembly of Microstructural Units. *Energy & Environmental Science*, **15**, 5405-5414. <https://doi.org/10.1039/d2ee03341k>
- [7] Chen, C., Zhou, L., Yu, J., Wang, Y., Nie, S., Zhu, S., *et al.* (2018) Dual Functional Asymmetric Plasmonic Structures for Solar Water Purification and Pollution Detection. *Nano Energy*, **51**, 451-456. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.06.077>
- [8] Balitskii, O.A. (2021) Recent Energy Targeted Applications of Localized Surface Plasmon Resonance Semiconductor Nanocrystals: A Mini-Review. *Materials Today Energy*, **20**, Article ID: 100629. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2020.100629>
- [9] Wang, X., Liu, Q., Wu, S., Xu, B. and Xu, H. (2019) Multilayer Polypyrrole Nanosheets with Self-Organized Surface Structures for Flexible and Efficient Solar-Thermal Energy Conversion. *Advanced Materials*, **31**, Article ID: 1807716. <https://doi.org/10.1002/adma.201807716>
- [10] Tian, Y., Li, Y., Zhang, X., Jia, J., Yang, X., Yang, S., *et al.* (2022) Breath-Figure Self-Assembled Low-Cost Janus Fabrics for Highly Efficient and Stable Solar Desalination. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 2113258. <https://doi.org/10.1002/adfm.202113258>
- [11] Huang, W., Huang, Y., You, Y., Nie, T. and Chen, T. (2017) High-Yield Synthesis of Multifunctional Tellurium Nanorods to Achieve Simultaneous Chemo-Photothermal Combination Cancer Therapy. *Advanced Functional Materials*, **27**, Article ID: 1701388. <https://doi.org/10.1002/adfm.201701388>
- [12] Ma, C., Yan, J., Huang, Y., Wang, C. and Yang, G. (2018) The Optical Duality of Tellurium Nanoparticles for Broadband Solar Energy Harvesting and Efficient Photothermal Conversion. *Science Advances*, **4**, eaas9894. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9894>
- [13] Chen, J., Wang, X., Wang, B., Wu, T., Zhang, L., Zhang, K., *et al.* (2024) Recent Advances of Bio-Based Hydrogel Derived Interfacial Evaporator for Sustainable Water and Collaborative Energy Storage Applications. *Small*, **20**, Article ID: 2403221. <https://doi.org/10.1002/smll.202403221>
- [14] Li, J., Wang, X., Lin, Z., Xu, N., Li, X., Liang, J., *et al.* (2020) Over 10 kg M⁻² H⁻¹ Evaporation Rate Enabled by a 3D Interconnected Porous Carbon Foam. *Joule*, **4**, 928-937. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.02.014>

- [15] Du, H., Li, Y., Meng, J., Wei, R., Meng, Q., Cao, Y., *et al.* (2025) A Cost-Effective, Salt-Resistant and Environmentally Stable Solar Evaporator with a Wetting-Gradient Bilayer Structure for Long-Term Seawater Desalination. *Chemical Engineering Journal*, **505**, Article ID: 158957. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158957>
- [16] Li, H., Zhang, W., Liu, J., Sun, M., Wang, L. and Xu, L. (2023) Self-Assembled Nanofibrous Hydrogels with Tunable Porous Network for Highly Efficient Solar Desalination in Strong Brine. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article ID: 2308492. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308492>
- [17] Lei, C., Guan, W., Guo, Y., Shi, W., Wang, Y., Johnston, K.P., *et al.* (2022) Polyzwitterionic Hydrogels for Highly Efficient High Salinity Solar Desalination. *Angewandte Chemie International Edition*, **61**, e202208487. <https://doi.org/10.1002/anie.202208487>
- [18] Ruan, W., Zhang, H., Fu, J., Li, Z., Huang, J., Liu, Z., *et al.* (2024) Dissolution Manufacturing Strategy for Designing Efficient and Low Cost Polymeric Solar Water Evaporator. *Advanced Functional Materials*, **34**, Article ID: 2312314. <https://doi.org/10.1002/adfm.202312314>
- [19] Zhou, X., Guo, Y., Zhao, F. and Yu, G. (2019) Hydrogels as an Emerging Material Platform for Solar Water Purification. *Accounts of Chemical Research*, **52**, 3244-3253. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.9b00455>
- [20] Zhao, X., Zhang, H., Chan, K., Huang, X., Yang, Y. and Shen, X. (2024) Tree-Inspired Structurally Graded Aerogel with Synergistic Water, Salt, and Thermal Transport for High-Salinity Solar-Powered Evaporation. *Nano-Micro Letters*, **16**, Article No. 222. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01448-8>
- [21] Wang, J., Bao, X., Yuan, M., Zhu, C., Zhu, L. and Chen, S. (2025) Easy Access to Robust Rigid SiO₂-Based Photothermal Aerogel for Enhanced Solar Interfacial Evaporation. *Separation and Purification Technology*, **353**, Article ID: 128324. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128324>
- [22] Ren, Y., Zhang, G., Hui, H., Guo, Z., Tian, M. and Zhang, Q. (2023) Design of a Pyrrole/Polyimide Fiber-Based Janus Aerogel to Suppress Salt Deposition and Enhance Solar Steam Generation Performance. *Desalination*, **562**, Article ID: 116712. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116712>
- [23] Pang, Y., Ma, C., Song, L., Jin, L., Zhu, K., Wu, Y., *et al.* (2024) Constructing Thermal Convection Film for Low Heat Loss and High Salt Resistance in Wood-Based Solar Evaporators. *Small*, **20**, Article ID: 2403141. <https://doi.org/10.1002/smll.202403141>
- [24] Zhu, R., Wang, D., Zhang, J., Yu, Z., Liu, M. and Fu, S. (2022) Biomass Eggplant-Derived Photothermal Aerogels with Janus Wettability for Cost-Effective Seawater Desalination. *Desalination*, **527**, Article ID: 115585. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115585>
- [25] Wu, D., Gao, Y., Dai, Z., Chen, B., Wang, C. and Zhang, X. (2022) Alkali Treatment Combined with Surface Carbonized Wood for High-Efficiency Solar Interfacial Evaporation. *Applied Thermal Engineering*, **213**, Article ID: 118646. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118646>
- [26] Ma, H., Zhang, S., Guo, X., Liu, M., Wu, S., Tang, J., *et al.* (2023) Cone/Plate Structured Photothermal Evaporator with Obviously Improved Evaporation Properties by Suppressing Thermal Conduction-Caused Heat Loss. *Separation and Purification Technology*, **307**, Article ID: 122754. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122754>
- [27] Huang, H., Zhao, L., Yu, Q., Lin, P., Xu, J., Yin, X., *et al.* (2020) Flexible and Highly Efficient Bilayer Photothermal Paper for Water Desalination and Purification: Self-Floating, Rapid Water Transport, and Localized Heat. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 11204-11213. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b22338>
- [28] Menon, A.K., Haechler, I., Kaur, S., Lubner, S. and Prasher, R.S. (2020) Enhanced Solar Evaporation Using a Photothermal Umbrella for Wastewater Management. *Nature Sustainability*, **3**, 144-151. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0445-5>
- [29] Yang, Y., Wang, D., Liao, W., Zeng, H., Wu, Y., Li, L., *et al.* (2024) Arch-Bridge Photothermal Fabric with Efficient Warp-Direction Water Paths for Continuous Solar Desalination. *Advanced Fiber Materials*, **6**, 1026-1036. <https://doi.org/10.1007/s42765-024-00392-x>
- [30] Li, X., Lin, R., Ni, G., Xu, N., Hu, X., Zhu, B., *et al.* (2017) Three-Dimensional Artificial Transpiration for Efficient Solar Waste-Water Treatment. *National Science Review*, **5**, 70-77. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx051>
- [31] Jin, Z., Zhang, M., Mei, H., Liu, H., Pan, L., Yan, Y., *et al.* (2023) 3D-Printed Chiral Torsion Janus Evaporator with Enhanced Light Utilization Towards Ultrafast and Stable Solar-Water Desalination. *Carbon*, **202**, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.11.035>
- [32] Yao, H., Zhang, P., Yang, C., Liao, Q., Hao, X., Huang, Y., *et al.* (2021) Janus-interface Engineering Boosting Solar Steam Towards High-Efficiency Water Collection. *Energy & Environmental Science*, **14**, 5330-5338. <https://doi.org/10.1039/d1ee01381e>
- [33] Xu, W., Hu, X., Zhuang, S., Wang, Y., Li, X., Zhou, L., *et al.* (2018) Flexible and Salt Resistant Janus Absorbers by Electrospinning for Stable and Efficient Solar Desalination. *Advanced Energy Materials*, **8**, Article ID: 1702884. <https://doi.org/10.1002/aenm.201702884>

- [34] Chen, J., Yin, J.L., Li, B., Ye, Z., Liu, D., Ding, D., *et al.* (2020) Janus Evaporators with Self-Recovering Hydrophobicity for Salt-Rejecting Interfacial Solar Desalination. *ACS Nano*, **14**, 17419-17427. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c07677>
- [35] Xu, T., Lu, P., Xu, J., Li, Z. and Guan, S. (2025) Design of a Facile Self-Floating Bio-Based Janus Evaporators for Efficient and Stable Solar Desalination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 116007. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116007>
- [36] Xiao, Y., Liu, B., Li, D., Zheng, X., Li, J. and Qin, G. (2024) Biomimetic Hydrogel Evaporator with Excellent Salt-Rejection Performance via Edge-Preferential Crystallization and Ion-Transport Effects. *Chemical Engineering Journal*, **497**, Article ID: 155038. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155038>
- [37] Wen, Y., Deng, S., Xie, Q., Guo, F., Huang, H., Sun, C., *et al.* (2025) Nanofibrous Hydrogel with Highly Salt-Resistant Radial/Vertical-Combined Structure for Efficient Solar Interfacial Evaporation. *Small*, **21**, Article ID: 2411780. <https://doi.org/10.1002/sml.202411780>
- [38] Dong, Y., Violet, C., Sun, C., Li, X., Sun, Y., Zheng, Q., *et al.* (2025) Ceramic-Carbon Janus Membrane for Robust Solar-Thermal Desalination. *Nature Communications*, **16**, Article No. 2659. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57888-2>
- [39] Li, Q., Chen, D. and Jiao, X. (2025) Double-Layer Janus Sponge Evaporator: Optimal Balancing between Evaporation Efficiency and Salt Resistance. *Chemical Engineering Journal*, **506**, Article ID: 160085. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160085>
- [40] Zhang, Q., Liu, A., Jing, L., Huang, J., Zhang, M., He, Y., *et al.* (2024) Innovative 3D Janus Foam Design Achieves High-Efficiency and Stable Solar Desalination with Improved Salt Resistance and Heat Management. *Chemical Engineering Journal*, **499**, Article ID: 155887. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155887>
- [41] Qu, M., Zhao, Y., Ge, J., Xue, Y., Mu, L., Liu, Q., *et al.* (2023) Multi-Functional Janus Hollow Solar Evaporator Based on Copper Foam for Non-Contact High-Efficiency Solar Interfacial Distillation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15**, 36999-37010. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c06049>
- [42] Jiang, H., Liu, X., Wang, H., Wang, D., Guo, Y., Wang, D., *et al.* (2023) Waterwheel-Inspired Rotating Evaporator for Efficient and Stable Solar Desalination Even in Saturated Brine. *Science Bulletin*, **68**, 1640-1650. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.07.011>
- [43] Wu, X., Wang, Y., Wu, P., Zhao, J., Lu, Y., Yang, X., *et al.* (2021) Dual-Zone Photothermal Evaporator for Antisalt Accumulation and Highly Efficient Solar Steam Generation. *Advanced Functional Materials*, **31**, Article ID: 2102618. <https://doi.org/10.1002/adfm.202102618>
- [44] Wang, X., Zhang, L., Zheng, D., Xu, X., Bai, B. and Du, M. (2023) A Polyelectrolyte Hydrogel Coated Loofah Sponge Evaporator Based on Donnan Effect for Highly Efficient Solar-Driven Desalination. *Chemical Engineering Journal*, **462**, Article ID: 142265. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142265>
- [45] He, N., Wang, H., Zhang, H., Jiang, B., Tang, D. and Li, L. (2024) Ionization Engineering of Hydrogels Enables Highly Efficient Salt-Impeded Solar Evaporation and Night-Time Electricity Harvesting. *Nano-Micro Letters*, **16**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01215-1>
- [46] He, H., Song, X., Huang, M., Hou, X., Song, Z. and Zhang, Y. (2023) A Photothermal and Conductive Composite Hydrogel Membrane for Solar-Driven Synchronous Desalination and Salinity Power Generation. *Green Chemistry*, **25**, 9343-9350. <https://doi.org/10.1039/d3gc02453a>