

太阳能界面蒸发基体材料研究进展

邵甲栋, 张建斌*

兰州交通大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

太阳能界面蒸发技术通过热局域效应实现高效光热转换, 在海水淡化、废水净化等领域应用前景广阔。基体材料作为界面蒸发器的核心支撑组件, 承担水传输、热管理与力学支撑功能, 其结构与材料选择直接影响蒸发性能。近年来, 研究者围绕功能集成、热管理调控及蒸发焓降低等研究方向开展了大量探索, 但不同材料体系在水输运能力及长期稳定性方面仍面临各自的挑战。本文从结构维度对比二维薄膜与三维块体基体的热管理机制及优化策略。围绕泡沫、气凝胶、水凝胶及天然生物质四类基体材料, 系统归纳其结构特征、性能表现与改性思路, 并展望未来发展方向。

关键词

太阳能界面蒸发, 多孔基体材料, 海水淡化

Research Progress on Substrate Materials for Solar-Driven Interfacial Evaporation

Jiadong Shao, Jianbin Zhang*

School of Materials Science and Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Solar-driven interfacial evaporation technology achieves efficient photothermal conversion through thermal localization, and holds broad application prospects in fields such as seawater desalination and wastewater purification. As the core supporting component of the interfacial evaporator, the substrate material undertakes the functions of water transport, thermal management, and mechanical support; its structural design and material selection directly affect the evaporation performance. In recent years, researchers have carried out extensive explorations focusing on research directions

*通讯作者。

such as functional integration, thermal management regulation, and reduction of evaporation enthalpy, but different material systems still face respective challenges in water transport capacity and long-term stability. This paper first compares the thermal management mechanisms and optimization strategies of two-dimensional film and three-dimensional bulk substrates from the perspective of structural dimensionality, then systematically summarizes the structural characteristics, performance, and modification strategies of the four types of substrate materials—foams, aerogels, hydrogels, and natural biomass—and discusses future development directions.

Keywords

Solar-Driven Interfacial Evaporation, Porous Substrate Materials, Desalination

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

淡水短缺是当今全球面临的重大挑战之一[1]。太阳能驱动的界面蒸发技术因其可再生、零排放、可分布式部署等优势,成为可持续淡水生产的研究热点[2][3]。与传统体相加热方式不同,该技术通过将光热材料定位于气-液界面,实现热局域化,显著提高了光热转换效率[4]。作为蒸发器的核心载体,基体材料的结构与性质直接影响蒸发器内部的水运输与热传导行为。根据结构差异,可将基体分为二维薄膜基体和三维块体基体两类。

2014年,Ghasemi等[4]提出热局域化概念,采用石墨烯薄片与三维多孔碳泡沫基体组合的双层结构,验证了界面蒸发的可行性。此后,二维薄膜基体作为独立蒸发结构的研究逐渐受到关注。2015年,Yu等[5]系统研究了基体润湿性对蒸发性能的影响,揭示了支撑层的表面化学在光热界面蒸发中的主导作用。2018年,Xu等[6]设计了具有功能分区的双层Janus膜,在保持高效水传输的同时抑制盐沉积。2022年,Song等[7]建立了二维界面蒸发系统的理论评估模型,明确了其理论蒸发速率极限约为 $1.46 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2017年,Li等[8]提出了一种三维空心锥体结构,有效减少了热损耗,是首次将三维结构用于高效界面蒸发的代表性研究之一。2018年,Zhou等[9]制备了水凝胶基界面蒸发器,通过聚合物网络与水分子间的相互作用可显著降低水蒸发所需的能量壁垒,为突破传统蒸发效率瓶颈开辟了新路径。2022年,Zhang等[10]受荷叶结构启发,设计了一种仿生三维界面蒸发器。该蒸发器具有高光吸收率,并能从环境中捕获额外热能,从而实现了153.20%的超高能量效率。此外,泡沫、气凝胶、水凝胶及天然结构等基体材料体系也得到了广泛探索[11]-[14]。

本文聚焦于太阳能界面蒸发器中的基体材料,论述近年来二维薄膜与三维块体基体的热管理机制及优化策略,并围绕泡沫、气凝胶、水凝胶及天然结构体系,归纳其结构特征、性能表现与改性思路,最后分析当前面临的关键挑战并展望未来发展方向。

2. 基体的结构设计

二维薄膜基体具有厚度薄、质量轻、吸水性好等特点,光热转换材料通常原位生长于其上表面[15]。然而,由于厚度较薄,光热层产生的热量容易通过基体传导至下方水体,造成热损失。为改善该局限,研究者常在光吸收层与水传输层之间引入一层低热导率的隔热层,构建多层结构以强化热管理。

Hu 等[16]设计了一种具有三层结构的仿生二维光热织物, 如图 1(a)所示, 该蒸发器将二维材料的上表面、下表面及内部通道壁面均纳入蒸发面, 实现了四平面蒸发的独特构型。这一设计突破了传统二维蒸发器仅依赖上表面蒸发的局限, 通过多平面协同蒸发显著提升了有效蒸发表面积。在一个太阳光照下蒸发速率达 $2.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。Wang 等[17]设计了一种具有微米级超薄水膜的二维金属基蒸发器, 通过构筑 10 微米级别超薄水膜使水分子以团簇的形式蒸发, 降低蒸发能垒, 实现了 $4.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和 90.8% 的蒸发效率。

三维基体则通常具有一定厚度、低密度和低热导率的特点, 光热转换材料可通过共混或原位生长方式与之结合[18]。三维基体不仅具备良好的热管理能力和力学稳定性, 还可通过其侧面捕获环境中的热量, 从而进一步提升整体蒸发效率[19]。然而, 三维蒸发器依旧面临结构设计复杂、制备工艺要求高以及复杂外界环境下的运行稳定性不足等问题[20]。

Zhang 等[21]构筑了具有双层仿生结构的三维气凝胶蒸发器。如图 1(b)所示, 该蒸发器的侧壁温度低于环境温度, 可通过对流与辐射从周围环境中主动捕获热量, 从而在太阳光照之外获得额外的能量增益。在一个太阳光照下蒸发速率达 $3.87 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。此外, 如图 1(c)所示, 该蒸发器同时利用结构内对 Na^+ 和 Cl^- 的选择透过性实现了 222.6 mV 的电压输出。Yu 等[22]利用 3D 打印技术辅助构建具有相互连通通道的分级多孔网络, 实现了对水传输路径与热管理行为的精准调控。在一个太阳光照下蒸发速率达 $3.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 并在高盐度(25 wt%)条件下仍能保持 $2.84 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率, 展现出优异的抗盐性能。

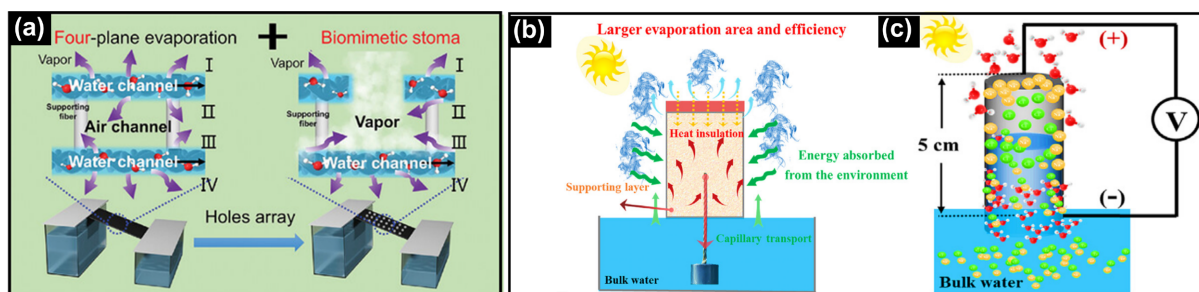


Figure 1. (a) Four-sided evaporation structure of a two-dimensional evaporator [16]; (b) Schematic diagram of ambient heat absorption and (c) concentration gradient power generation in a three-dimensional evaporator [21]

图 1. (a) 二维蒸发器的四面蒸发结构[16]; (b) 三维蒸发器的环境吸热及(c) 浓差发电示意图[21]

3. 基体材料的选择

为应对上述二维与三维结构设计中存在的热损失、稳定性不足等挑战, 研究者们从基体材料的本征结构出发, 开发了多种高性能体系。下面将分别评述水凝胶、泡沫材料、天然生物质材料及气凝胶四类常见基体材料的研究进展。

3.1. 泡沫类光热界面蒸发基体材料

泡沫类材料是一类具有三维连通孔道结构的多孔介质, 通常由固相骨架与相互贯通的微米级孔隙构成, 其密度低、结构可塑性强, 是光热界面蒸发器中广泛采用的基体之一[11]。该类材料在分类上常被归入三维蒸发器范畴。其骨架不仅为水分子传输与蒸汽逸散提供了低曲折度通道, 且高比表面积特性有利于光热组分的均匀负载[23]。研究者通过表面涂覆[24]、原位生长[25]和浸渍[26]等方式将光热材料与泡沫复合, 获得兼具高效光热转换与稳定水传输的蒸发器。近年来, 泡沫基光热界面蒸发材料进一步聚焦于结构精密化、多功能集成与机械稳定性方面。

如图 2(a)所示, Cheng 等[27]受大葱层叠卷曲结构启发, 利用泡沫镍的高塑性, 通过原位生长 CuS 亲

水光热粒子与机械构型, 设计出具有分层卷曲结构的三维蒸发器。分层卷曲形成的螺旋通道与三维通孔结构构建了高效的多级水传输路径, 赋予蒸发器优异的抗盐结晶能力与持久运行稳定性。分层卷曲的几何特征增加了光的内反射路径, 在 1 kW/m^2 模拟太阳光照下, 其干态的表面温度可达 62.9°C (图 2(b))。如图 2(c) 所示, 数值模拟表明隔热侧壁能有效抑制热量向水体耗散, 强化了热局域效应; 同时, 侧壁较低的表面温度使其通过对流与辐射捕获环境中的热量。在 1 个太阳光照下蒸发速率高达 $6.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 且在 20 wt% 盐水中稳定运行 140 h 无盐结晶。

如图 2(d) 所示, Jiang 等[28] 基于开环易位聚合与 NaCl 牺牲模板法, 通过聚合前预混光热组分 ACAT, 一步制备了泡沫基界面蒸发器。得益于其制备工艺简便、易于规模化, 实现了 $800 \times 600 \text{ mm}^2$ 的大面积制备 (图 2(e))。该蒸发器在 1 个太阳光照下实现 $3.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和 96.7% 的光热转换效率。同时, 在处理高浓度 LiCl-MgCl₂ 混合溶液时, Mg²⁺ 优先结晶析出, Li⁺ 在残留卤水中显著富集, Mg²⁺/Li⁺ 浓度比从 5:1 降至 2.6:1, 实现了太阳能蒸发与锂提取的协同。

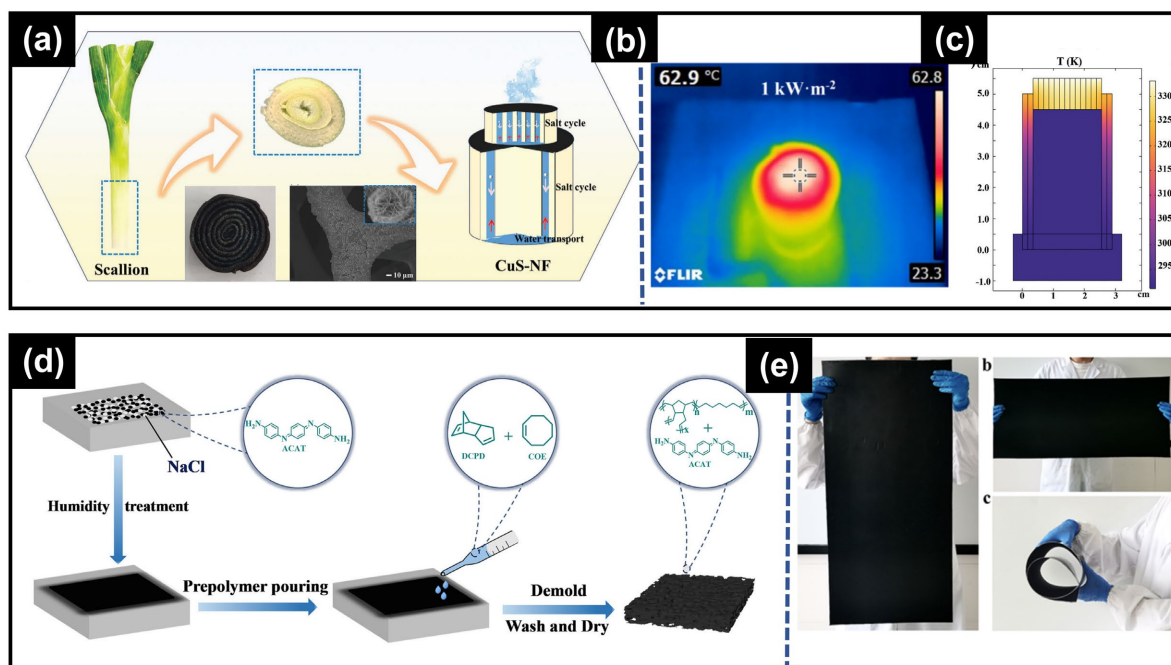


Figure 2. Structure and performance of foam-based interfacial evaporators. (a) Schematic illustration of the CuS-NF structure [27]; (b) Heating thermographic image of CuS-NF [27]; (c) Temperature distribution simulation with and without PS foam [27]; (d) Photograph of a large-scale foam evaporator [28]; (e) Variation of salt precipitation mass with Mg²⁺/Li⁺ concentration ratio, indicating that Li⁺ accumulates in brine [28]

图 2. 泡沫基界面蒸发器的结构与性能。(a) CuS-NF 结构示意图[27]; (b) CuS-NF 的升温热成像图[27]; (c) 有无 PS 泡沫的温度分布模拟[27]; (d) 大尺寸泡沫蒸发器实物图[28]; (e) 盐析出质量与 Mg²⁺/Li⁺ 浓度比变化, 表明 Li⁺ 在卤水中富集[28]

3.2. 气凝胶基体材料

气凝胶是一类由纳米颗粒或聚合物链段交联构筑的三维网络结构, 其孔径分布于纳米尺度。通过对前聚模板的控制, 其既可成型为二维薄膜, 亦可构筑为三维块体。得益于纳米级孔隙的限域效应, 气凝胶具有更低的密度与热导率, 然而较小的孔径造成的传质及蒸汽逸散阻力不容忽视。此外, 传统无机气凝胶脆性大, 机械强度低, 限制了其在实际应用中的使用[29]。为克服这一缺陷, 研究者通过引入柔性聚合物, 以及构建多级孔结构, 制备出兼具良好柔韧性与高强度的高性能气凝胶基蒸发器。

Zhou 等[30]将天然乳胶引入石墨烯气凝胶中, 采用微气泡结合冰晶模板法及常压干燥工艺, 制备了具有三维互连多孔结构的弹性复合气凝胶。所制备的气凝胶孔隙率高达约 97%, 热导率低至 $0.038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。在 90%应变下压缩强度达 66.9 kPa。1 个太阳光照下, 该气凝胶蒸发速率达 $2.68 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 光热转换效率为 94.54%。在 10 wt%盐水中循环蒸发 10 次后, 蒸发速率仍维持在约 $2.10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 表现出良好的结构稳定性与耐盐性能。

Ma 等[31]制备了基于聚氨酯海绵与聚乙烯醇的复合气凝胶 PPC, 借助聚氨酯骨架的力学支撑(断裂强度 285 kPa)与聚乙烯醇网络的超亲水性, 在 1 个太阳光照下实现了 $3.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和 95.6% 的光热转换效率, 材料成本低至 $\text{¥}14.25/\text{m}^2$ 。经多次机械应力测试后仍保持稳定的蒸发性能。

3.3. 水凝胶基体材料

水凝胶是以水为分散介质, 由亲水性聚合物链通过物理缠结、氢键或共价键交联形成的三维网络材料[32]。在构型维度上, 水凝胶依托其本征三维网络直接成型为块体蒸发器, 通过刮涂、纺丝等简易成型工艺亦可便捷地制备为二维薄膜。其亲水网络既具备持续的水合与输水能力, 又能借助聚合物-水分子相互作用调控内部水的存在状态[33]。如图 3(a)所示, 水凝胶内的水分子依据其与聚合物链相互作用的强弱, 可分为结合水、中间水与自由水。其中, 中间水分子受到聚合物链上亲水基团的氢键扰动, 其水-水之间的氢键网络被削弱, 因而其等效蒸发焓显著低于自由水[34]。然而, 在蒸发器实际运行的过程中, 盐结晶析出、耐久性不足、长期运行稳定性下降等问题仍有待解决。针对上述挑战, 研究者从孔结构设计、水传输机制升级、抗盐机制等角度开展了广泛研究。

Wu 等[34]通过可控气泡模板发泡法, 构建了具有可调大孔结构的壳聚糖/碳纳米管海绵状水凝胶, 如图 3(b)所示, 该工作以微米级贯通孔道取代传统水凝胶的分子渗透网络, 实现了水传输机制由渗透压驱动向毛细驱动的转变, 并协同实现了非溶胀结构稳定性、热局域化效应及水蒸发焓的进一步降低。高度为 7 cm 的该水凝胶在 1 个太阳辐照下, 凭借充足的向上水分传输能力和对周围环境能量的自发捕获, 实现了 $5.50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的优异蒸发速率。且在 14 wt%高盐盐水中连续淡化 50 h, 该蒸发器仍能维持 $4.80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高蒸发速率, 展现出优异的抗盐稳定性。

Zhang 等[35]报道了具有专一水通道的超水合两性离子水凝胶。通过两性离子基团与水分子形成强氢键削弱水分子之间的氢键, 使蒸发焓降至约 1450 J/g 。在 1 个太阳光照下, 其蒸发速率达 $2.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 并在 10 wt%高盐溶液中连续运行 100 小时无盐结晶积累。此外, 两性离子的强水化层对蛋白质、细菌和藻类等污染物表现出优异的抗黏附能力, 为提升蒸发器在复杂水质条件下的服役可靠性提供了新思路。

3.4. 天然结构基体材料

天然结构材料因来源广泛、可再生、环境友好以及具有分级多孔结构, 在光热界面蒸发领域受到广泛关注[36]-[38]。与人工合成材料通过工艺调控实现跨维度成型不同, 天然结构材料的维度特征直接源于其所采用的具体材料形态, 木材、竹材等块体材料天然呈现三维构型, 而叶片、花瓣等薄片材料则天然具备二维特征。这类材料通常沿生长方向排列的垂直微通道, 可凭借毛细作用实现高效水分输运; 然而, 天然材料在富含微生物的环境中易发生生物降解和生物污损, 影响长期运行稳定性。近年来, 研究者围绕化学改性、结构调控等策略, 致力于提升天然生物质基蒸发器的蒸发效率与耐久性。

Tian 等[39]制备了磺化木材蒸发器, 如图 3(c)所示, 通过脱除天然木材中的木质素, 原本致密的细胞壁结构被疏通, 暴露出沿生长方向排列的垂直微通道; 进一步在细胞壁表面接枝磺酸基团, 在保留原有通道结构的同时增强润湿性。磺酸基团与水分子形成大量氢键, 削弱了水分子之间的氢键网络, 诱导中间水形成, 使蒸发焓从 $1800 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 降至 $1197 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在 1 个太阳光照下, 该蒸发器实现了 $3.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$

的蒸发速率和 97.2% 的光热转换效率。Wang 等[40]设计了双功能木质素工程化重组木材蒸发器, 通过将木质素含量从 25.77% 调控至 16.70%, 使蒸发焓降至 $1397 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$; 同时将回收的木质素激光刻蚀为石墨烯/石墨碳复合光热层, 实现 95.48% 的光吸收率, 蒸发速率达 $2.24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 光热转换效率为 91.52%。

此外, 不同种类的自然结构也进一步用于光热界面蒸发器。Yang 等[41]利用竹材的天然弱界面结合特性, 构建了具有扫帚状开放纤维间隙结构的竹材蒸发器。垂直排列的纤维束与薄壁细胞形成多尺度开放通道, 提高蒸汽扩散效率, 在一个太阳光照下蒸发速率达 $3.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 能量效率达 146.7%。Sajjadizade 等[42]利用松果等天然分形结构材料作为基体, 通过涂覆 FeNi 纳米颗粒实现光热转换, 在 1 个太阳光照下蒸发速率达 $1.73 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 光热转换效率为 97.6%。

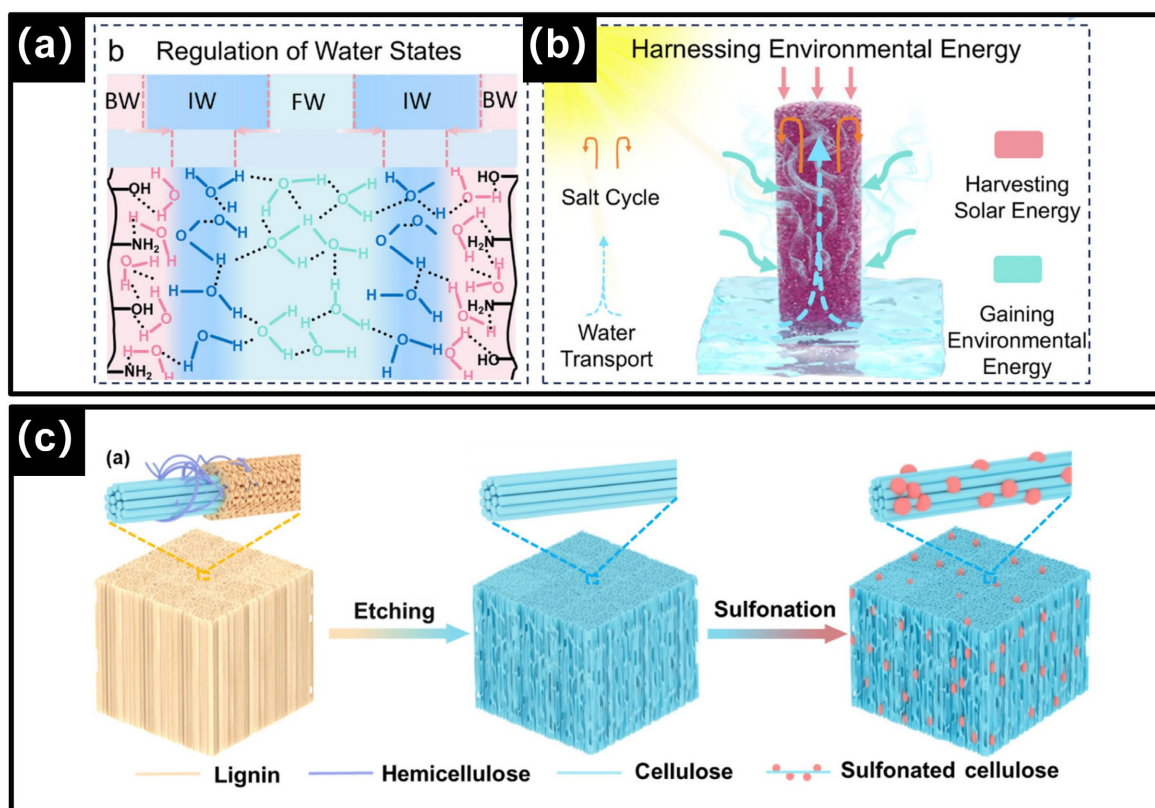


Figure 3. (a) Intermediate water structure induced by hydrogel-based polymer chains [34]; (b) Schematic diagram illustrating energy conversion and anti-salt mechanisms [34]; (c) Schematic diagram of the fabrication process of a sulfonated wood evaporator based on natural structural materials [39]

图 3. (a) 水凝胶基聚合物链诱导的中间水结构[34]; (b) 能量转换与抗盐机理图[34]; (c) 天然结构材料磺化木材蒸发器的制备流程示意图[39]

4. 不同基体材料的综合性能比较与权衡

综合前述各节对泡沫、气凝胶、水凝胶及天然结构四类基体材料的逐一分析, 本节从蒸发性能、机械强度、抗盐/抗污能力、制备成本、技术成熟度及环境友好性六个维度进行系统比较, 并结合典型应用场景探讨各类材料的适用性与局限性[43]。表 1 汇总了四类基体材料在各评价维度上的定性等级与核心特征。需要指出的是, 表中评级基于同类材料中典型体系的综合表现, 特定改性策略可能使个别体系的性能偏离所述等级。

Table 1. Comprehensive performance comparison of four types of photothermal interfacial evaporator substrate materials
表 1. 四类光热界面蒸发器基体材料综合性能比较

	泡沫类	气凝胶类	水凝胶类	天然结构类
蒸发性能	◇ 良好 三维连通孔道利于快速供水, 可设计性强	◇ 良好 隔热性能优异, 纳米孔道传质阻力制约供水通量	◆ 优秀 水活化能力强, 等效蒸发焓低, 蒸发速率居前	◇ 良好 依赖天然孔道输水, 批次间结构存在差异
机械强度	◆ 优秀 弹性回复性好, 长期服役存在老化脆裂风险	◇ 良好 复合增韧效果好, 但规模化体系的一致性仍待验证	◇ 良好 可设计性强, 但本征强度低于泡沫与天然材料	◆ 优秀 各向异性力学性能优异, 湿态衰减通过改性改善
抗盐/抗污	◇ 良好 Janus 等结构保障高盐耐受性, 抗污能力可控	◇ 良好 结构设计调控盐输运, 孔隙内部盐监测待完善。	◆ 优秀 道南效应排斥盐离子, 强水合表面避免生物污损	△ 有待提升 户外服役易发生生物降解与霉变, 抗污能力较弱
制备成本	◆ 较低 基体成本较低, 表面改性增量成本可控	△ 高 超临界工艺复杂, 常压干燥有望替代	◇ 中等 原料成本适中, 具备多种低成本制备工艺	◆ 低 原料来源广泛, 加工成本极低
技术成熟度	TRL 3~8	TRL 2~7	TRL 3~7	TRL 3~7
环境友好性	多数难降解	部分可降解	部分可降解	完全可降解

注: 符号说明: ◆: 该维度具有显著优势; ◇: 性能居中, 存在优化空间; △: 存在明显短板, 为制约实用化的关键瓶颈。TRL 等级参考 NASA 九级分类标准界定, 旨在提供定性比较的技术成熟度框架——四类材料均已存在体系在户外真实环境中完成原型验证, 但各材料向更高 TRL 跨越所面临的核心瓶颈各不相同[44]。

上述综合比较揭示了各类材料的共性特征与差异化优势, 但在实际应用中, 蒸发器的适用性高度依赖于具体场景对性能权重的不同侧重。以下以高盐废水处理与便携式海水淡化两种典型场景为例, 进一步阐释四类材料的场景适配逻辑。

高盐工况对蒸发器的核心挑战在于维持水-盐双向输运的动力学平衡, 蒸发界面水分持续散失, 盐分不断浓缩, 若盐分向水体回流的速率低于浓缩速率, 结晶便不可避免[45]。四类材料在应对这一挑战时呈现出差异化的机制与瓶颈。水凝胶类通过道南效应与强水合层, 从分子尺度将盐离子“推”离蒸发界面, 而非仅依赖浓度梯度的被动扩散。泡沫类的三维连通微米孔道为盐分向下扩散提供了低曲折度的对流通路, Janus 结构与超亲水策略进一步强化了这一过程, 使其在 20 wt% 盐水中的稳定运行成为可能。气凝胶类通过分级孔设计同样可实现高盐度下的零结晶运行, 但其纳米孔道内盐结晶有待研究, 长期服役中孔隙内部盐积累的原位监测是亟须突破的技术盲区。天然结构类因易发生生物降解与霉变, 在高盐富营养化水体中应谨慎选用。

便携式场景则对蒸发器提出了低成本、轻量化、易部署与可折叠性的综合要求, 四类材料在该场景下的适用性体现了不同维度的权衡。天然结构类原料成本极低、可自然降解, 在一次性或短期应急装置中优势显著, 但其湿态强度衰减与批次差异需在设计中加以补偿。泡沫类技术成熟度高、弹性回复性佳, 其大面积制备能力与可折叠收纳特性高度契合规模化便携设备的需求, 主要制约在于聚合物基体的环境负担。水凝胶类蒸发性能最为优异, 但力学强度偏低、自支撑能力有限, 需依托骨架复合或封装结构方可满足便携场景的结构要求, 这些附加结构在一定程度上抵消了其本身的低成本优势。气凝胶类因制备成本偏高, 在成本敏感的便携式应用中竞争力较弱, 仅在极端温差环境中, 其超低热导率的独特优势才可能抵消成本劣势。

5. 总结与展望

本文系统梳理了太阳能界面蒸发基体材料的研究进展, 从结构维度对比了二维薄膜与三维块体基体的热管理机制, 并围绕泡沫、气凝胶、水凝胶及天然生物质四类材料体系, 归纳了其结构特征、性能表现与改性策略。二维薄膜需借助隔热层抑制热损失, 三维块体可捕获环境热但稳定性不足; 泡沫、气凝胶、水凝胶分别在功能集成、热管理调控及蒸发焓降低方面取得了显著进展, 天然结构材料则通过化学改性与结构调控展现出良好的应用潜力。

然而, 当前仍存在诸如高性能基体材料多依赖复杂制备工艺或昂贵前驱体, 低成本规模化制备尚未实现; 水传输、热管理与抗盐抗污等多功能协同优化缺乏系统性设计准则; 长期运行稳定性评估标准不一, 实际环境下的耐久性数据匮乏等挑战。未来, 结合理论计算与机器学习辅助设计, 开发多功能一体化、可规模化制备的基体材料, 建立标准化的性能评估体系, 并推动基体从被动载体向主动功能元件的转变, 将是该领域的核心发展方向。

参考文献

- [1] Liu, J., Zhang, S., Wang, J. and Lan, Q. (2025) Recent Progress in Solar-Driven Interfacial Evaporation: Evaporators, Condensers, Applications and Prospects. *Desalination*, **597**, Article ID: 118356. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118356>
- [2] Su, H., Zhang, S., Li, L., Wang, Y., Xu, Q., Li, X., et al. (2025) Research Progress in Enhanced Water Production Strategies for Solar-Driven Interface Evaporation. *RSC Applied Interfaces*, **2**, 1558-1585. <https://doi.org/10.1039/d51f00191a>
- [3] Kim, H.T., Philip, L., McDonagh, A., Johir, M., Ren, J., Shon, H.K., et al. (2024) Recent Advances in High-Rate Solar-Driven Interfacial Evaporation. *Advanced Science*, **11**, e2401322. <https://doi.org/10.1002/adv.202401322>
- [4] Ghasemi, H., Ni, G., Marconnet, A.M., Loomis, J., Yerci, S., Miljkovic, N., et al. (2014) Solar Steam Generation by Heat Localization. *Nature Communications*, **5**, Article No. 4449. <https://doi.org/10.1038/ncomms5449>
- [5] Yu, S., Zhang, Y., Duan, H., Liu, Y., Quan, X., Tao, P., et al. (2015) The Impact of Surface Chemistry on the Performance of Localized Solar-Driven Evaporation System. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 13600. <https://doi.org/10.1038/srep13600>
- [6] 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>
- [7] Song, Z., Tiraferri, A., Yuan, R., Cao, J., Tang, P., Xie, W., et al. (2022) Theoretical Evaluation of the Evaporation Rate of 2D Solar-Driven Interfacial Evaporation and of Its Large-Scale Application Potential. *Desalination*, **537**, Article ID: 115891. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115891>
- [8] 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>
- [9] Zhou, X., Zhao, F., Guo, Y., Zhang, Y. and Yu, G. (2018) A Hydrogel-Based Antifouling Solar Evaporator for Highly Efficient Water Desalination. *Energy & Environmental Science*, **11**, 1985-1992. <https://doi.org/10.1039/c8ee00567b>
- [10] Zhang, R., Xiang, B., Wang, Y., Tang, S. and Meng, X. (2022) A Lotus-Inspired 3D Biomimetic Design toward an Advanced Solar Steam Evaporator with Ultrahigh Efficiency and Remarkable Stability. *Materials Horizons*, **9**, 1232-1242. <https://doi.org/10.1039/d1mh02020j>
- [11] Gao, Y., He, J., Li, J., Zhang, Y., Zhu, M., Zhang, J., et al. (2025) Recent Advances and Challenges in Sponge-Based Solar Interfacial Evaporators for Desalination. *Materials Today Energy*, **52**, Article ID: 101968. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2025.101968>
- [12] Xiao, J., Zhang, T., Shi, Z. and Dong, S. (2025) Application and Research Progress of Aerogel-Based Interfacial Evaporation in Solar Desalination Technology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 117490. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117490>
- [13] Zhang, X., Na, H., Liu, D. and Li, H. (2025) Hydrogel-Based Solar Interfacial Evaporators: Design, Performance, and Applications. *Processes*, **13**, Article No. 3921. <https://doi.org/10.3390/pr13123921>
- [14] Wang, J., Li, X., Wang, Q., Xu, Q., Wang, Y., Guo, Z., et al. (2025) Balanced Hydrothermal Transfer and Driven Solar Interfacial Evaporation by a Bionic Hydrogel with a Hierarchical Multilevel Radial Structure. *Separation and Purification Technology*, **361**, Article ID: 131660. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131660>

- [15] Ren, H., Hu, J., Pazuki, M., Peng, Y., Maleki, F., Salimi, M., *et al.* (2025) 2D Cotton Fabric Coated with 3D Chitosan/Carbon-Black Aerogel for Continuous Efficient Solar Desalination. *Chemical Engineering Journal*, **514**, Article ID: 163276. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163276>
- [16] Hu, J., Pazuki, M., Li, R., Salimi, M., Cai, H., Peng, Y., *et al.* (2025) Biomimetic Design of Breathable 2D Photothermal Fabric with Three-Layered Structure for Efficient Four-Plane Evaporation of Seawater. *Advanced Materials*, **37**, Article ID: 2420482. <https://doi.org/10.1002/adma.202420482>
- [17] Wang, F., Wang, C., Wei, D., Li, G., Zhang, W. and Zhao, Z. (2025) Engineering Thin Water Film and Cluster Evaporation towards Extraordinarily High 2D Solar Vapor Generation. *Materials Today*, **90**, 258-269. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.09.023>
- [18] Wu, T., Wu, D., Deng, Y., Luo, D., Wu, F., Dai, X., *et al.* (2024) Three-Dimensional Network-Based Composite Phase Change Materials: Construction, Structure, Performance and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **199**, Article ID: 114480. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114480>
- [19] Zhang, J.H., Mittapally, R., Oluwade, A. and Chen, G. (2025) Mechanisms and Scale-Up Potential of 3D Solar Interfacial-Evaporators. *Energy & Environmental Science*, **18**, 5524-5538. <https://doi.org/10.1039/d5ee01104c>
- [20] Su, W., Liu, Z., Jin, X., Liu, Z., Yang, D. and Zhang, X. (2025) A Comprehensive Review on 3D Interfacial Solar Evaporation for Sustainable Desalination and Integrated Energy Management: Structural Optimization Strategies, Advanced Materials, and Emerging Applications. *Applied Energy*, **402**, Article ID: 126926. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126926>
- [21] Zhang, C., Zhuang, S., Dai, L., Long, Z. and He, Z. (2025) Biomass-Based 3D Solar Interface Evaporators Integrating Efficient Evaporation and Power Generation. *Journal of Energy Chemistry*, **110**, 873-883. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2025.07.041>
- [22] Yu, Z., Xu, L., Liu, C., Guo, W., Fu, M. and Yuan, B. (2025) 3D Printed-Assisted Fabrication of Embedded Porous Solar Evaporators for Efficient Photothermal Evaporation. *Desalination*, **615**, Article ID: 119252. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119252>
- [23] Burman, I. and Sinha, A. (2022) Impact Assessment of Mixed Liquor Suspended Solids from Polyurethane Media Effluent on Ceramic Membrane Fouling in Anaerobic Hybrid Membrane Bioreactor. *Journal of Environmental Engineering*, **148**, Article ID: 04021076. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001956](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001956)
- [24] Liu, Z., Gong, Z., Li, X., Ren, J., Gong, J., Qu, J., *et al.* (2023) Mass Production of Biodegradable Porous Foam for Simultaneous Solar Evaporation and Thermoelectricity Generation. *Journal of Materials Chemistry A*, **11**, 26784-26793. <https://doi.org/10.1039/d3ta06133g>
- [25] Lin, J., Wu, M., Fang, H., Wu, M., Li, S., Zhang, H., *et al.* (2024) Scalable, Bio-Inspired and Self-Floating Bi-Layer Polyurethane Foam Solar Evaporator with Excellent Capillary Hydrodynamic Effect. *Chemical Engineering Journal*, **482**, Article ID: 148909. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148909>
- [26] Wang, K., Cheng, Z., Li, P., Zheng, Y., Liu, Z., Cui, L., *et al.* (2021) Three-Dimensional Self-Floating Foam Composite Impregnated with Porous Carbon and Polyaniline for Solar Steam Generation. *Journal of Colloid and Interface Science*, **581**, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.136>
- [27] Cheng, S., He, E., Zhang, P., Sutar, R.S., Kannan, S.K., Balu, S.K., *et al.* (2025) Scallion-Inspired Environmental Energy Enhanced Solar Evaporator with Integrated Water Transport and Thermal Management. *Advanced Functional Materials*, **35**, Article ID: 2423011. <https://doi.org/10.1002/adfm.202423011>
- [28] Jiang, C., Yan, Z., Bai, Y., Li, R., Wu, M., Yu, W., *et al.* (2025) Scalable, High-Efficiency Porous Monolithic Polymer Foam for Solar-Driven Interfacial Water Evaporation and Lithium Extraction. *NPJ Clean Water*, **8**, Article No. 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-025-00474-2>
- [29] Su, J., Liu, R., Liu, S., Ru, C., Yan, X., Su, D., *et al.* (2025) Preparation of Low-Thermal-Conductivity and High-Strength GPTMS Polymer Cross-Linked SiO₂ Aerogels via a Two-Step Modification Method. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **668**, Article ID: 123798. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2025.123798>
- [30] Zhou, W., Li, X., Zhang, N., Zhang, Z. and Yuan, Y. (2026) Microbubble-Based Elastic Graphene Aerogel for Efficient Solar-Driven Interfacial Evaporation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **294**, Article ID: 113933. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113933>
- [31] Ma, W., Wang, J., Weng, Y., You, L., Fang, L. and Zheng, F. (2025) High-Efficiency, Excellent Mechanical Strength and Low-Cost Solar Interfacial Evaporation Aerogel Based on Polyurethane Sponge and Polyvinyl Alcohol. *Chemical Engineering Journal*, **519**, Article ID: 165353. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165353>
- [32] Huang, X., Cui, Y., Kumar, N., Sun, J., Lin, Y., Nuraje, N., *et al.* (2025) Advances in Hydrogel-Based Solar-Driven Interfacial Evaporation Systems: The Pivotal Factors and Design Strategies from Photothermal Engineering to Energy Management. *Separation and Purification Technology*, **379**, Article ID: 134834. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134834>

- [33] Guo, Y. and Yu, G. (2021) Engineering Hydrogels for Efficient Solar Desalination and Water Purification. *Accounts of Materials Research*, **2**, 374-384. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.1c00057>
- [34] Wu, J., Yin, G., Liu, Y., Wang, Z., Jiao, F., Hou, S., *et al.* (2025) Construction of Sponge-Like Hydrogel with Tunable Porous Structure by Microbubble Engineering for High-Yield Solar-Driven Desalination of Brine. *Small*, **21**, e10184. <https://doi.org/10.1002/sml.202510184>
- [35] Zhang, P., Liang, H., Du, Y., Wang, H., Tian, Y., Bi, J., *et al.* (2025) Superhydrated Zwitterionic Hydrogel with Dedicated Water Channels Enables Nonfouling Solar Desalination. *Nano-Micro Letters*, **18**, Article No. 87. <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01937-4>
- [36] Zhu, J., Zhang, J., Zha, J., Zhao, S., Ren, W., Wang, B., *et al.* (2026) Engineering Renewable Lignocellulosic Biomass as Sustainable Solar-Driven Interfacial Evaporators. *Nano-Micro Letters*, **18**, Article No. 174. <https://doi.org/10.1007/s40820-025-02000-y>
- [37] Qin, Z., Sun, H., Tang, Y., Yang, X., Kong, L., Yin, S., *et al.* (2023) Janus Biomass Aerogel for Highly-Efficient Steam Generation, Desalination, Degradation of Organics and Water Disinfection. *Journal of Colloid and Interface Science*, **640**, 647-655. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.02.156>
- [38] Zhu, K., Ma, C., Song, L., Jin, L., Wang, J., Wei, J., *et al.* (2025) A Stabilized High-Performance Algal Contamination-Resistant and Salt-Free Wood-Based Suspension Solar Evaporator. *Journal of Colloid and Interface Science*, **699**, Article ID: 138298. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.138298>
- [39] Tian, M., Chen, J., Tian, J., Liang, Z. and Xie, Y. (2025) Natural Wood with Optimal Capillary Water Content and Evaporation Enthalpy for Efficient Interfacial Solar Steam Generation. *Materials Horizons*, **12**, 5771-5779. <https://doi.org/10.1039/d5mh00394f>
- [40] Wang, B., He, Y., Yang, Z., Sun, Q., Zhang, X., Shen, X., *et al.* (2026) Reconstitution of Woody Biomass Framework via Dual-Functional Lignin Engineering toward Efficient and Salt-Resistant Solar Desalination. *Nature Communications*, **17**, Article No. 1234. <https://doi.org/10.1038/s41467-026-70270-0>
- [41] Yang, R., Yang, Y., Liu, Q., Feng, Q., Wu, J. and Yu, Y. (2026) Highly Efficient and Salt-Tolerant Broom-Like Bamboo Solar Evaporator: Constructing Multiscale Open Gaps to Enhance Water Transportation and Vapor Diffusion. *Energy & Environmental Materials*, **9**, e70265. <https://doi.org/10.1002/eem2.70265>
- [42] Sajjadizadeh, H., Goharshadi, E.K. and Dehghani, R. (2025) Bio-Inspired 3D Substrates for Efficient Interfacial Solar Steam Generation: Feni Nanoparticles-Coated Wood Sponge and Pine Cone for Sustainable Desalination. *ChemistrySelect*, **10**, e202500243. <https://doi.org/10.1002/slct.202500243>
- [43] Zaed, M.A., Tan, K.H., Saidur, R. and Pandey, A.K. (2025) Navigating Solar Thermal Desalination: A Comprehensive Review of Materials Selection Criteria. *Transactions of Tianjin University*, **31**, 524-553. <https://doi.org/10.1007/s12209-025-00450-4>
- [44] Fellows, C.M., Mustakeem, M., Al-Ghamdi, A.S., Brown, T.C. and Ihm, S. (2026) Interfacial Photothermal Solar Desalination: A Call to Repentance. *Desalination*, **617**, Article ID: 119433. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119433>
- [45] Liu, S., Yang, Q., Li, S. and Lin, M. (2025) A Comprehensive Review of Salt Rejection and Mitigation Strategies in Solar Interfacial Evaporation Systems. *Desalination*, **600**, Article ID: 118507. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118507>