

复合水凝胶在大气水收集中的研究进展与性能优化策略

周丹, 冯悦, 李丹, 杨茂春

浙江师范大学含氟新材料研究所, 先进催化材料教育部重点实验室, 浙江 金华

收稿日期: 2026年1月26日; 录用日期: 2026年2月27日; 发布日期: 2026年3月9日

摘要

全球水资源短缺已成为紧迫问题, 大气集水(AWH)技术为缓解水资源短缺问题开辟了全新路径。水凝胶凭借三维网络结构、高溶胀率、结构可调节性等核心优势, 逐渐成为大气集水领域的关键材料。通过引入吸湿组分、光热组分等功能单元, 复合水凝胶的水吸附能力持续提升, 且能高效促进水分释放。本文综述了已报道的复合水凝胶分类体系, 并探讨了提升复合水凝胶AWH性能的核心技术路径, 最后对该领域的潜在突破方向与未来前景进行了深入展望。

关键词

复合水凝胶, 吸湿盐, 金属有机框架, 大气水收集

Research Progress and Performance Optimization Strategies of Composite Hydrogels in Atmospheric Water Harvesting

Dan Zhou, Yue Feng, Dan Li, Maochun Yang

Zhejiang Normal University Institute of Advanced Fluorine-Containing Materials, Key Laboratory of Advanced Catalytic Materials, Ministry of Education, Jinhua Zhejiang

Received: January 26, 2026; accepted: February 27, 2026; published: March 9, 2026

Abstract

Global water scarcity has evolved into an urgent global challenge, and atmospheric water harvesting

文章引用: 周丹, 冯悦, 李丹, 杨茂春. 复合水凝胶在大气水收集中的研究进展与性能优化策略[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(3): 318-325. DOI: 10.12677/aep.2026.163033

(AWH) technology has paved an innovative avenue for alleviating this crisis. Thanks to its core merits including three-dimensional network structure, high swelling ratio and structural tunability, hydrogel has gradually emerged as a pivotal material in the field of AWH. By incorporating functional moieties such as hygroscopic and photothermal components, the water adsorption capacity of composite hydrogels has been continuously enhanced, accompanied by efficient facilitation of water release. This review summarizes the reported classification systems of composite hydrogels, discusses the core technical pathways for enhancing their AWH performance, and finally presents an in-depth outlook on the potential breakthrough directions and future prospects of this research field.

Keywords

Composite Hydrogel, Hygroscopic Salt, Metal-Organic Framework (MOF), Atmospheric Water Harvesting (AWH)

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

全球水资源短缺已成为制约人类发展的关键挑战。世界卫生组织(WHO)的报告指出,全球三分之一的人口缺乏安全饮用水[1][2]。全球淡水仅占总水量的 2.53%,其中 68.7%以冰川、冻土形式存在,可供人类直接使用的淡水资源十分匮乏[3];加之降水在区域与季节上分布不均,导致干旱半干旱地区先天缺水[4]。人口不断增长、城市化进程的加快使生活用水需求激增,而工农业的发展不仅需要更多的水资源,还会因废水处理不当也会导致水污染问题,进一步压缩可用淡水资源总量。

解决水资源短缺的常见技术分为传统水资源补给技术和新型大气水收集(AWH)技术。传统水资源补给技术如海水淡化[5],依靠蒸馏[6]、反渗透[7]等技术去除海水中的盐分,转化为淡水。废水净化[8][9]技术通过物理、化学、生物工艺[10]净化工业废水、生活污水,达到饮用水或灌溉用水标准。这些技术通常受地理条件限制,且复杂的工业流程与高昂的运营投资成本也阻碍了其全球范围的长期部署。大气中储存约 12.9 万亿立方米水[11],它是随处可用的自然资源,开采大气水为缓解水资源短缺问题开辟了全新路径。

基于大气水收集的淡水技术包括雾水收集[12]、露水收集[13]和吸附式[14]大气水收集。雾水收集通过特殊表面结构如仿生材料[15]、网状织物[16]等捕获空气中的微小液滴,汇集为液态水。其工艺简单、成本低,但对环境湿度要求高,干旱地区无法使用。同样露水收集通过冷却装置将空气降温至露点以下,使水蒸气凝结为液态水也受环境湿度限制。而基于吸附剂的 AWH 技术通过吸附剂自发从大气中吸附水汽,再经加热、光照等能量输入实现水汽释放,不受地理位置与气候条件约束,成为最具应用潜力的技术路径。

吸附式 AWH 依赖吸附材料的亲水性与孔隙率,传统吸附剂如硅胶[17]表面具有极性羟基,与水分子作用通过物理吸附实现水收集,但硅胶吸附容量相对较低。具有多孔结构的沸石[18]则通过氢键吸引水分子,与硅胶类似沸石的吸水率也较低,这限制了其在 AWH 上的应用。吸湿盐[19]是一类具有强烈吸湿特性的盐类化合物如氯化锂、氯化钙等,可通过物理吸附、化学吸附或潮解作用从空气中自发捕获水汽,经加热、光照等能量输入实现水分子释放。这类吸湿盐在低相对湿度下仍能实现快速吸附水汽,且成本低廉,但存在明显缺陷,吸湿后形成的盐溶液若缺乏载体束缚易发生泄露,并且盐溶液的腐蚀性会导致

设备的损坏；此外，水分释放通常需要较高温度，导致能源消耗较大限制了其在大气水收集上的应用。近年来，研究焦点转向水凝胶、金属有机框架(MOF)、共价有机框架(COF) [20]等新型材料。MOF [21]是一类由金属离子或金属簇与有机配体配位形成的晶体材料，MOF 结构可调、孔隙率高、低湿度环境下仍可以实现水分吸附。但制备复杂、有机溶剂消耗大、价格昂贵且存在毒性争议。水凝胶作为具有亲水性的聚合物网络，虽固有吸湿型聚合物水凝胶在低相对湿度下吸附效率有限，但其组成与结构的灵活可调性，可通过复合其他功能组分优化性能。本文综述复合水凝胶在 AWH 中的最新研究进展，系统分类不同类型复合水凝胶的设计思路与性能，探讨提升其 AWH 性能的核心策略，并展望该领域的未来发展方向。

2. 复合水凝胶材料的分类

水凝胶[22]是一类具有三维交联网络结构的聚合物材料，具有成本低、高亲水性、高吸水容量、结构可调节等优势。水凝胶的制备方式包括化学交联与物理交联[23]。通过向水凝胶中引入特定功能组分，还可以赋予其吸湿性、温度响应[24]、光响应[25]等刺激响应性特征。在 AWH 应用中，水凝胶常作为吸湿剂、光敏剂、热敏剂等功能组分的承载基质。通过调节孔隙率，可增加功能组分与水分子的接触面积；通过提高机械性能可延长使用寿命；通过优化溶胀性能，可确保水凝胶在吸水-脱水循环中维持结构稳定与水分负载能力。精准匹配 AWH “快速高效吸湿稳定可控脱附”的核心需求。根据复合功能组分的差异，用于 AWH 的复合水凝胶可分为以下四类。

2.1. 吸湿盐复合水凝胶

这类水凝胶的设计思路是将吸湿盐嵌入水凝胶网络，以水凝胶作为“载体”，利用水凝胶的溶胀特性抑制盐溶液泄露与潮解，同时结合吸湿盐的快速吸水动力学与水凝胶的结构稳定性，解决纯吸湿盐的应用缺陷。例如，Wang [26]等人开发的阳离子聚电解质水凝胶 PAMPS-CNT-LiCl，通过聚合物链中带负电荷的磺酸基团与 Li⁺形成较强的静电相互作用实现盐离子的锚定，有效抑制盐聚集与渗漏，而未配位的游离态 LiCl 进一步提升水吸附容量。该吸附剂在 15%、30%和 60% RH 条件下，吸水率分别为 0.65 g·g⁻¹、1.00 g·g⁻¹和 1.87 g·g⁻¹，为聚电解质水凝胶的盐锁定策略提供了重要参考。

Gu [27]等人制备的掺杂 LiCl 缠结增强型海绵水凝胶 XD-PP@LiCl，通过调节水凝胶网络的交联密度构建连续微通道，提升吸放湿动力学；同时利用 PDMAPS 与 LiCl 的协同作用形成内部渗透压梯度，既促进水分运输，又实现吸附活性位点的持续再生。该复合水凝胶在 20%~90% RH 范围内表现出优异的吸附动力学 0.95~1.48 g·g⁻¹·h⁻¹，且在 30% RH、1 个太阳辐照强度下的解吸速率达 7.57 g·g⁻¹·h⁻¹，有效解决了盐水脱附能耗高的问题。

2.2. 盐-MOF 复合水凝胶

传统吸湿盐水凝胶复合材料易受盐析效应影响，导致溶胀受限，集水性能下降。针对这一问题，研究员通过结合两性离子聚合物的“盐溶效应”与 MOF 的高孔隙率特性，构建复合载体固定吸湿盐，突破单一材料的吸附瓶颈。Wang [28]等人开发的 PML 复合水凝胶，以 PDMAPS (两性离子聚合物)的溶胀特性扩大储水空间，MIL-101(Cr)增加吸附活性位点，LiCl 提供强吸湿能力，三者协同作用下，PML 在 25℃、40% RH 条件下，水蒸气吸附容量达 0.614 g·g⁻¹；在 25℃、90% RH 条件下，吸附容量提升至 1.827 g·g⁻¹，验证了聚合物-金属有机框架协同固定吸湿盐的有效性。

Rojas [29]等人选用来源广泛，成本低廉的氧化纤维素纳米纤维(TOCNF)、海藻酸钠(NaAlg)等生物材料构建气凝胶三维骨架，摒弃高能耗的冷冻干燥工艺，采用常温干燥工艺降低制备成本；同时引入 MOF-303 协同固定 LiCl，有效抑制盐泄露与团聚。此外，MOF 还能够增强材料在低相对湿度下的水分捕获能

力, 所制备的气凝胶在 12 小时内, 25% RH 下的吸水率可达 $0.32 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 90% RH 下的吸水率可达 $3.52 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 兼顾性能与经济性。

2.3. MOF 复合水凝胶

这类水凝胶无需引入吸湿盐, 而是通过协同整合 MOF 的快速吸附动力学与水凝胶的高储水能力实现性能突破。Tang [30] 等人在 CT/PVA 水凝胶基底上定向生长 Zn-TCPP MOF 纳米片。垂直排列的 Zn-TCPP MOF 纳米片兼具超亲水特性与多孔结构, 可通过毛细管冷凝效应快速捕获空气中的水蒸气; 纵向生长的纳米片显著扩大了气-固接触界面; MOF 纳米片本身及纳米片间形成的孔道构成“快速传输路径”, 结合 MOF 与水凝胶间的表面自由能差异, 推动冷凝后的水分子快速向 CT/PVA 水凝胶基底迁移。CT/PVA 水凝胶具有高亲水性与交联网络结构能容纳大量水分子, 有效避免传统 MOF 吸附剂“捕获易、储存难”的问题, 最终在 90% RH 下实现 $4.44 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高吸水量与超快吸附速率。

2.4. 聚电解质复合吸湿水凝胶

区别于依赖吸湿盐或 MOF 的复合路径, 这类水凝胶通过聚电解质复合实现本征吸湿, 从分子机制层面优化吸湿性能。Zhang [31] 等人以羧甲基壳聚糖(CMCS, 带负电)与季铵化壳聚糖(QCS, 带正电)为原料, 通过调节 CMCS 与 QCS 的比例使水凝胶表面接近电中性, 减少极性水分子与带电表面的静电排斥, 使更多水分子无需复杂偶极矩重排即可接近凝胶表面, 降低吸湿能量壁垒。同时, 聚电解质链上的羧基($-\text{COO}^-$)、季铵基($-\text{N}^+$)等亲水基团与水分子形成氢键, 结合定向冷冻工艺制备的垂直排列的多孔通道, 实现水蒸气快速吸附与储存。该类无吸湿盐水凝胶在 60%~95% RH 下, 2 小时内即可快速捕获 $0.52\sim 1.18 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的水分。该研究深入揭示水-聚合物相互作用机制, 为未来通过表面化学设计开发超快速大气集水及其他吸附类应用提供了新方向。

3. 提升复合水凝胶 AWH 性能的策略

为进一步优化复合水凝胶的 AWH 综合性能, 需从“吸湿”与“脱湿”两大核心环节入手: 吸湿优化聚焦扩大接触面积、提升吸附动力与容量; 脱湿优化聚焦降低能耗、加快释放速率, 同时拓展无能量依赖的脱附路径。

3.1. 吸湿性能优化

吸湿性能优化的核心是降低传质阻力、增加吸附活性位点, 主要通过结构调控与功能组分引入实现。针对传统致密水凝胶(CDHs)传质阻力大、吸附动力学缓慢的瓶颈, Ni [32] 等人采用冷冻凝胶法通过“缠结网状限制”构建稳定大孔拓扑结构, 在保留高溶胀性的同时降低传质阻力。

Qi [33] 等人则通过仿生设计制备 TPMS 结构水凝胶 TSEHs, 模仿海星 TPMS 骨架构建分层多孔结构, 突破“材料厚度与吸附速率”的矛盾, 提升厚层水凝胶的实际应用潜力。此外, 引入吸湿盐、MOF 等功能组分可显著提升吸附动力, 使水凝胶在宽湿度范围(尤其是低湿度)下保持高效吸附。

3.2. 脱湿性能优化

脱湿性能直接决定 AWH 的实际产水效率, 核心是通过技术手段实现“低能耗、快速化、无依赖”的水分释放, 主要包括以下三类策略。

3.2.1. 化学改性

通过分子结构改性赋予水凝胶低温脱附能力, 减少能量消耗。Yu [34] 等人对纤维素、淀粉、壳聚糖等生物质进行羟丙基(HP)或羟丁基(HB)接枝改性, 破坏分子间强氢键, 提升水溶性与加工性, 同时赋予

低临界溶解温度(LCST), 实现低温下疏水相互作用驱动的高效脱附; 此外, 引入两性离子基团通过“盐溶效应”解决吸湿盐添加导致的溶胀性下降与盐泄漏问题, 最大化盐负载量。制备的纤维素基分子功能化生物质水凝胶 MFBH 在 15% RH 下吸水量达 $0.86 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 30% RH 下 $1.32 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 60% RH 下 $2.18 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 且 60°C 下可脱附 95% 吸附水, 兼顾性能与环保性。

3.2.2. 温敏 - 光响应组分整合

通过整合光响应与温敏组分, 利用清洁能源驱动脱附, 适配实际应用场景。光响应组分如碳纳米管(CNT) [35]、石墨烯(GO/rGO) [36] 等将光能转化为热能, 直接为解吸提供能源, 无需外接电、热设备; 温敏组分如聚 N-异丙基甲基丙烯酰胺(PNIPAM, LCST $\approx 43^\circ\text{C}$) [37]、羟丙基纤维素(HPC, $\approx 45^\circ\text{C}$) [38] 可实现吸脱附切换, 但传统温敏水凝胶存在热致收缩破坏结构、导致盐泄漏的问题。

Han [39] 等人设计的 TOCN/PNIPAM 复合水凝胶, 通过刚性 TOCN 抑制收缩, PNIPAM 提供热响应, 负载 LiCl 增强吸湿性, CNT 提升光热转换效率, 从材料层面解决了结构收缩、盐泄漏、动力学缓慢、脱附耗能高的技术瓶颈。

3.2.3. 机械压缩模式水释放

针对传统光热脱附依赖光照的局限性, 机械压缩模式无需外部能量输入, 适用于无光照或应急场景。Feng [40] 等人设计的双模式 Janus 生物气凝胶(DBJA), 通过“太阳能 + 机械压缩”双模式实现大气水收集。就太阳辐照强度对脱附动力学的影响而言, 23°C 、50% 相对湿度条件下吸附饱和 DBJA, 于 1 倍太阳辐照下 2 小时内可释放了 88% 的吸附水, 对应产水量 $1.27 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。而采用手动机械压缩模式, 5 次吸附 - 压缩循环的总产水效率达 $12.80 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。经 50 次压缩 - 膨胀循环后, DBJA 的多孔结构与吸湿组分分布仍保持均匀, 无明显坍塌或团聚。并且机械压缩循环后收集水中 Li^+ 浓度符合 WHO 饮用水标准, 不同批次制备稳定性好。为保障水质安全, 还通过自制过滤器进一步纯化释放水, 其生物基组分与模块化设计符合可持续发展趋势, 为 AWH 技术从实验室走向实际应用提供了关键突破。

4. 结论与展望

复合水凝胶依托“载体适配性强、结构可调控、性能协同优化”的核心优势, 已成为 AWH 领域的核心研究热点。借助复合吸湿盐、MOF 等功能组分, 或通过聚电解质复合实现本征吸湿, 复合水凝胶切实破解了传统吸附材料的吸附容量低、盐泄漏、能耗高等难题。经由结构调控、化学改性、响应组分整合及机械压缩脱附等策略, 进一步精进其吸湿 - 脱湿性能与场景适配性, 为 AWH 技术的性能升级提供了高效路径。

尽管如此, 复合水凝胶从实验室迈向规模化应用, 仍面临三大关键工程化瓶颈。水质安全层面, 需在防控盐泄漏的基础上, 考虑高湿度环境引发的微生物污染问题, 保障脱附水的安全性与材料使用寿命。热管理方面, 通过高效潜热耗散策略进一步解决吸附过程床层升温导致的吸附抑制问题, 防止 MOF 团聚与界面结合被破坏。材料机械稳定性方面, 需进一步强化材料在实际应用中的溶胀 - 收缩循环结构长效性, 减轻开裂、组分脱落等结构疲劳现象。

未来, 复合水凝胶在 AWH 领域的发展需以性能优化、瓶颈突破、规模化生产为核心, 协同推进。首先, 优化功能组分与水凝胶基质的界面作用, 借助吸湿 - 抗菌协同改性、抗疲劳交联网络设计及导热组分复合, 协同改进低湿度吸附容量、循环稳定性、微生物防控能力与热传导效率, 从材料本质层面破解多维度应用难题。其次, 研发成本低、规模化的洁净化制备工艺, 优化原位聚合 - 多级清洗 - 真空干燥流程, 降低有机残留与生产门槛。最后, 促进多模式脱附技术与一体化装置的深度融合, 融合光热脱附的长效性、机械压缩脱附的应急性与相变材料的潜热回收功能, 集成原位消毒与高效散热模块, 开发适

配复杂环境的 AWH 系统，提高水质安全保障与能量协同利用效率，最终实现从材料优势到实用解决应用的有效部署。

通过材料研发、结构与系统集成的多维度创新，复合水凝胶有望突破 AWH 技术的产业化瓶颈，为全球水资源短缺问题提供兼具性能优势、安全可靠性与成本可行性的核心方案，推动该领域从示范应用走向规模化普及。

参考文献

- [1] Oki, T. and Kanae, S. (2006) Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science*, **313**, 1068-1072. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- [2] Reverberi, A.P., Varbanov, P.S., Vocciante, M. and Fabiano, B. (2019) Bismuth Oxide-Related Photocatalysts in Green Nanotechnology: A Critical Analysis. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, **12**, 878-892. <https://doi.org/10.1007/s11705-018-1744-5>
- [3] Kattel, G.R. (2019) State of Future Water Regimes in the World's River Basins: Balancing the Water between Society and Nature. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **49**, 1107-1133. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1579621>
- [4] Liu, G., Qiu, M., Sun, L., Wen, Q., Xu, S., Wang, X., et al. (2016) Experimental Study on Seawater Applications in Organic Reactions. *Letters in Organic Chemistry*, **13**, 44-48. <https://doi.org/10.2174/1570178612666150928195231>
- [5] Zhen, X., Zheng, M., Zhao, C., Li, T., Li, J., Shi, S., et al. (2026) Fluorinated Carbon Nanotube Membranes Are Used for Efficient Anti-Salt Formation Solar Seawater Desalination in High-Salt Environments. *ACS Applied Engineering Materials*, **4**, 339-349. <https://doi.org/10.1021/acsaenm.5c01019>
- [6] Chen, Y., Yang, S., Wang, Z. and Elimelech, M. (2024) Transforming Membrane Distillation to a Membraneless Fabric Distillation for Desalination. *Nature Water*, **2**, 52-61. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00174-6>
- [7] Kavitha, J., Rajalakshmi, M., Phani, A.R. and Padaki, M. (2019) Pretreatment Processes for Seawater Reverse Osmosis Desalination Systems—A Review. *Journal of Water Process Engineering*, **32**, Article 100926. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100926>
- [8] Guo, Y., Lu, H., Zhao, F., Zhou, X., Shi, W. and Yu, G. (2020) Biomass-Derived Hybrid Hydrogel Evaporators for Cost-effective Solar Water Purification. *Advanced Materials*, **32**, Article 1907061. <https://doi.org/10.1002/adma.201907061>
- [9] Yi, Q., Tan, J., Liu, W., Lu, H., Xing, M. and Zhang, J. (2020) Peroxymonosulfate Activation by Three-Dimensional Cobalt Hydroxide/Graphene Oxide Hydrogel for Wastewater Treatment through an Automated Process. *Chemical Engineering Journal*, **400**, Article 125965. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125965>
- [10] Alharthi, M.S., Bamaga, O., Abulhair, H., Organji, H., Shaiban, A., Macedonio, F., et al. (2022) Evaluation of a Hybrid Moving Bed Biofilm Membrane Bioreactor and a Direct Contact Membrane Distillation System for Purification of Industrial Wastewater. *Membranes*, **13**, Article 16. <https://doi.org/10.3390/membranes13010016>
- [11] Schneider, S.H. (2011) Encyclopedia of Climate and Weather. Oxford University Press.
- [12] Nawaz, M.N., Khan, S.B. and Yuan, W. (2026) Biomimetic Surface Architectures Inspired by Cacti: Progress in Fog Water Harvesting Systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **14**, Article 121318. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121318>
- [13] Wei, L., Soo, H.S. and Chen, Z. (2024) Patterned Hybrid Surfaces for Efficient Dew Harvesting. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 51715-51726. <https://doi.org/10.1021/acsaami.4c11079>
- [14] El-Sharkawy, I.I., Gado, M.G., Sabouni, H., Abd-Elhady, M.M., Radwan, A., Abo-Khalil, A.G., et al. (2024) Material Characteristics and Selection Criteria for Adsorption-Based Atmospheric Water Harvesting: An Overview. *Solar Energy*, **283**, Article 112996. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112996>
- [15] Gunarasan, J.P.C. and Lee, J. (2025) Biomimetic Materials for Fog Harvesting: Prospects and Challenges. *Desalination*, **615**, Article 119324. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119324>
- [16] Chen, Y., Ji, Y., Li, X., Hou, K. and Cai, Z. (2024) Diatoms Inspired Green Janus Fabric for Efficient Fog Harvesting. *Advanced Sustainable Systems*, **9**, Article 2400664. <https://doi.org/10.1002/adsu.202400664>
- [17] Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y. and Li, B. (2016) A Comprehensive Review of Thermoelectric Technology: Materials, Applications, Modelling and Performance Improvement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **65**, 698-726. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.034>
- [18] Ansari, E., Elwaddood, S., Balakrishnan, H., Sapkaite, I., Munro, C., Karanikolos, G.N., et al. (2024) Sorption-Based Atmospheric Water Harvesters-Perspectives on Materials Design and Innovation. *Journal of Environmental Chemical*

- Engineering*, **12**, Article 113960. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113960>
- [19] Shan, H., Poredoš, P., Chen, Z., Yang, X., Ye, Z., Hu, Z., *et al.* (2024) Hygroscopic Salt-Embedded Composite Materials for Sorption-Based Atmospheric Water Harvesting. *Nature Reviews Materials*, **9**, 699-721. <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00721-x>
- [20] Nguyen, H.L. (2023) Covalent Organic Frameworks for Atmospheric Water Harvesting. *Advanced Materials*, **35**, Article 2300018. <https://doi.org/10.1002/adma.202300018>
- [21] Hanikel, N., Prévot, M.S. and Yaghi, O.M. (2020) MOF Water Harvesters. *Nature Nanotechnology*, **15**, 348-355. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0673-x>
- [22] Guo, Y., Bae, J., Fang, Z., Li, P., Zhao, F. and Yu, G. (2020) Hydrogels and Hydrogel-Derived Materials for Energy and Water Sustainability. *Chemical Reviews*, **120**, 7642-7707. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00345>
- [23] He, J., Yu, H., Wang, L., Yang, J., Zhang, Y., Huang, W., *et al.* (2024) Hygroscopic Photothermal Sorbents for Atmospheric Water Harvesting: From Preparation to Applications. *European Polymer Journal*, **202**, Article 112582. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112582>
- [24] Mao, Z., Yu, H., Yu, Z., *et al.* (2025) Synergistic Super-Hygroscopic Composite Gel for Enhanced Atmospheric Water Harvesting and Desalination Applications. Wiley Online Library.
- [25] Zhou, Z., Wang, G., Pei, X. and Zhou, L. (2023) Solar-Driven Mxene Aerogels with High Water Vapor Harvesting Capacity for Atmospheric Water Harvesting. *Chemical Engineering Journal*, **474**, Article 145605. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145605>
- [26] Shan, H., Poredoš, P., Ye, Z., Qu, H., Zhang, Y., Zhou, M., *et al.* (2023) All-Day Multicyclic Atmospheric Water Harvesting Enabled by Polyelectrolyte Hydrogel with Hybrid Desorption Mode. *Advanced Materials*, **35**, Article 2302038. <https://doi.org/10.1002/adma.202302038>
- [27] Hu, Y., Sun, J., Wu, Z., Zhou, R., Xiao, P., Gu, J., *et al.* (2025) Entanglement-Enhanced Sponge Hydrogels for High-efficiency Atmospheric Moisture Harvesting. *Small*, **21**, e12457. <https://doi.org/10.1002/sml.202512457>
- [28] Yan, J., Li, W., Yu, Y., Huang, G., Peng, J., Lv, D., *et al.* (2024) A Polyzwitterionic@mof Hydrogel with Exceptionally High Water Vapor Uptake for Efficient Atmospheric Water Harvesting. *Molecules*, **29**, e12457 1851. <https://doi.org/10.3390/molecules29081851>
- [29] Ghaffarkhah, A., Panahi-Sarmad, M., Rostami, S., Zaremba, O., Bauman, L.A., Hashemi, S.A., *et al.* (2025) Ambient-dried MOF/Cellulose-Based Aerogels for Atmospheric Water Harvesting and Sustainable Water Management in Agriculture. *Advanced Functional Materials*, **35**, Article 2506427. <https://doi.org/10.1002/adfm.202506427>
- [30] Zhang, L., Li, R., Zheng, S., Zhu, H., Cao, M., Li, M., *et al.* (2024) Hydrogel-Embedded Vertically Aligned Metal-Organic Framework Nanosheet Membrane for Efficient Water Harvesting. *Nature Communications*, **15**, Article No. 9738. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54215-z>
- [31] Ma, W., Zhang, W., Wei, R., Wen, S., Duan, X., Gu, Z., *et al.* (2026) Surface Charge Modulated Hydrogel for Faster Atmospheric Water Harvesting. *Water Research*, **293**, Article 125330. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125330>
- [32] Sun, J., Ni, F., Gu, J., Si, M., Liu, D., Zhang, C., *et al.* (2024) Entangled Mesh Hydrogels with Macroporous Topologies via Cryogelation for Rapid Atmospheric Water Harvesting. *Advanced Materials*, **36**, Article 2314175. <https://doi.org/10.1002/adma.202314175>
- [33] Mao, Z., Yu, H., Yu, Z., Tang, Z., Li, K., Osman, A., *et al.* (2025) Biomimetic TPMS Structure-Based Entangled Hydrogel for Efficient Solar-Driven Atmospheric Water Harvesting. *Advanced Materials*, e15166. <https://doi.org/10.1002/adma.202515166>
- [34] Guan, W., Zhao, Y., Lei, C., Wang, Y., Wu, K. and Yu, G. (2025) Molecularly Functionalized Biomass Hydrogels for Sustainable Atmospheric Water Harvesting. *Advanced Materials*, **37**, Article 2420319. <https://doi.org/10.1002/adma.202420319>
- [35] Mohammed Ali, A.S., Rashed, A.O., Almarzooqi, F., Jaoude, M.A. and Banat, F. (2026) Solar-Responsive Biopolymer-Carbon Nanotubes Aerogel for Efficient Atmospheric Water Harvesting. *Chemical Engineering Journal*, **528**, Article 172094. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.172094>
- [36] Abd Elwaddood, S.N., Farinha, A.S.F., Al Wahedi, Y., Al Alili, A., Witkamp, G., Dumée, L.F., *et al.* (2024) A Superhygroscopic Solar-Regenerated Alginate-Based Composite for Atmospheric Water Harvesting. *Small*, **20**, Article 2400420. <https://doi.org/10.1002/sml.202400420>
- [37] Zhang, Z., Wang, X., Li, H., Liu, G., Zhao, K., Wang, Y., *et al.* (2024) A Humidity/Thermal Dual Response 3d-Fabric with Porous Poly(N-Isopropyl Acrylamide) Hydrogel Towards Efficient Atmospheric Water Harvesting. *Journal of Colloid and Interface Science*, **653**, 1040-1051. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.09.116>
- [38] Yu, Y., Gu, W. and Sui, K. (2025) Thermoresponsive Aerogel Enabling Ultrafast Adsorption-Release Cycles for Atmospheric Harvesting. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, 32906-32913. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c05485>

-
- [39] Lu, J., Yan, J., Pei, F., Niu, Z., Li, J., Han, G., *et al.* (2025) Shrinkage-Resistant Thermo-Responsive Hygroscopic Hydrogel toward Ultra-Rapid Cycling Atmospheric Water Harvesting. *Advanced Functional Materials*, **35**, Article 2505359. <https://doi.org/10.1002/adfm.202505359>
- [40] Liu, Y., Feng, R., Zhao, Y., Guo, X., Ding, J., Liu, S., *et al.* (2025) Solar-Mechano Symbiosis Dual-Mode Janus Bioaerogel for Context-Adaptive Atmospheric Water Harvesting Beyond Solar Reliance. *Advanced Materials*, **37**, e12244. <https://doi.org/10.1002/adma.202512244>