

综 论

大气集水技术与材料：复合吸附剂及优化调控

周添红^{1,2,3}, 张 冕^{1,2,3}, 欧玉梅^{1,2,3}, 闵 芮^{1,2,3}, 马 凯^{1,2,3*}

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 随着全球水资源短缺问题的日益严重, 寻找可代替的淡水资源成为亟待解决的问题。大气集水 (AWH) 技术是一种从大气中获取水分的方法, 对于缓解全球水资源短缺问题具有极大的潜力。大气集水方式主要有雾气收集、基于冷凝的大气集水、膜辅助集水、基于吸附的大气集水。该文探讨了不同集水方式的原理及其各自的优缺点; 对比了基于吸附的大气集水技术中不同类型吸附剂的特点, 重点介绍了复合吸附剂的研究进展; 同时, 系统阐述了吸水、储/输水和释水过程中的优化调控策略; 最后, 对未来集水材料性能提升、产水水质优化、制备技术创新、智能化应用拓展方面的发展趋势进行了展望, 旨在为吸附剂的进一步发展和应用提供有益的参考和借鉴。

关键词: 大气集水; 水资源利用; 非常规水源水; 集水材料; 性能优化

中图分类号: TQ424 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2026) 05-0929-10

Atmospheric water harvesting technology and materials: Composite adsorbents and optimal regulation

ZHOU Tianhong^{1,2,3}, ZHANG Mian^{1,2,3}, OU Yumei^{1,2,3}, MIN Rui^{1,2,3}, MA Kai^{1,2,3*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Ministry of Education Engineering Research Center of Water Resource Comprehensive Utilization in Cold and Arid Regions, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: With the increasingly severe global water shortage problem, finding alternative freshwater resources needs to be addressed urgently. Atmospheric water harvesting (AWH) technology, a method for obtaining water from the atmosphere, holds great potential in alleviation on the global water shortage problem. The main methods of collecting water from the atmosphere include fog collection, condensation-based AWH, membrane-assisted AWH, and adsorption-based AWH. Herein, the principles of different water collection methods and their respective advantages as well as disadvantages were discussed. The characteristics of different types of adsorbents in adsorption-based AWH technology were compared, and the research progress on composite adsorbents was specifically introduced. At the same time, the optimization and regulation strategies in the processes of water absorption, storage/transportation, and water release were systematically expounded. Finally, the development trends in improving the performance of water collection materials, optimizing water quality, innovating preparation technologies, and expanding intelligent applications were prospected, with the aim to provide useful references and inspirations for further development and application of adsorbents.

Key words: atmospheric water harvesting; water resources utilization; unconventional source water; water collection materials; performance optimization

收稿日期: 2025-04-07; 定用日期: 2025-05-27; DOI: 10.13550/j.jxhg.20250236

基金项目: 甘肃省科技重大专项项目 (25ZDFA010); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目 (2023CYZC-41); 甘肃省高校产业支撑计划项目 (2023CYZC-36); 甘肃省教育厅高校科研创新平台重大培育项目 (2024CXPT-14)

作者简介: 周添红 (1984—), 男, 教授, E-mail: zhouth@163.com. 联系人: 马 凯 (1995—), 男, 讲师, E-mail: 947865172@qq.com.

水资源短缺问题是 21 世纪的重要挑战之一,世界上超过 50%的人口正经历不同程度的淡水资源短缺^[1]。中国西北和华北地区是主要的缺水区域,受影响的人口数量约占全国总人口数量的 24.5%。据估计,地球大气层的含水量是所有陆地河流的 6 倍,除地表水净化、污水回用、海水淡化、雨水收集等方法外,大气集水也是人类获取水资源的一种有效方式^[2](图 1a)。在干旱、半干旱地区,甚至是沙漠环境中,大气集水技术都展现出优异的集水能力,成为缓解水资源短缺的一种有效方法^[3]。

目前,大气集水方式可分为雾气收集、基于冷凝的大气集水、膜辅助集水、基于吸附的大气集水^[4]等(图 1b)。其中,雾气收集是通过捕捉悬浮在空气中的可见云、雾或冰晶等固体颗粒来实现的,其常用的方法是放置一个可捕获雾滴的垂直于风向的矩形网格,当暴露在有雾的环境中时,风携带的水滴被推到网格上而被捕获,水滴聚合增长,通过重力下落,将水收集输送到水箱^[5],该法只能在相对湿度(RH)达到 100%的环境中进行^[6];基于冷凝的大气

集水技术依赖于冷却或机械压缩来诱导气-液相变,该法需要 $RH > 70\%$ 的高湿度环境或相当大的冷却能量输入^[7];膜辅助集水是在电力驱动下利用水蒸气选择性膜从空气中提取湿气^[8]。基于全球能源匮乏问题以及全球超 1/3 的陆地面积年平均湿度 $< 40\%$ 的现状,上述方法均不具有普适性^[9]。

相较于以上 3 种方法,基于吸附的大气集水技术受环境的限制较少,可在更大范围的 RH (10%~100%) 下实现集水,并且可由低品位能源,特别是太阳能的驱动^[10],因此成为最具发展前景的大气集水技术^[11]。基于吸附的大气集水技术典型的集水过程包括吸附阶段:吸附剂对水蒸气的吸附;解吸再生阶段:由低品位能量驱动,通过吸附水的解吸和蒸发进行吸附剂再生;冷凝产水阶段:在封闭的空间内对解吸的水蒸气进行冷凝,产生液态淡水^[12](图 1c)。近年来,针对该技术研究主要聚焦于吸附剂的制备、运行模式的优化、集水装置的制造和材料填充方式以及传质传热效率和能源的高效利用等方面^[13]。

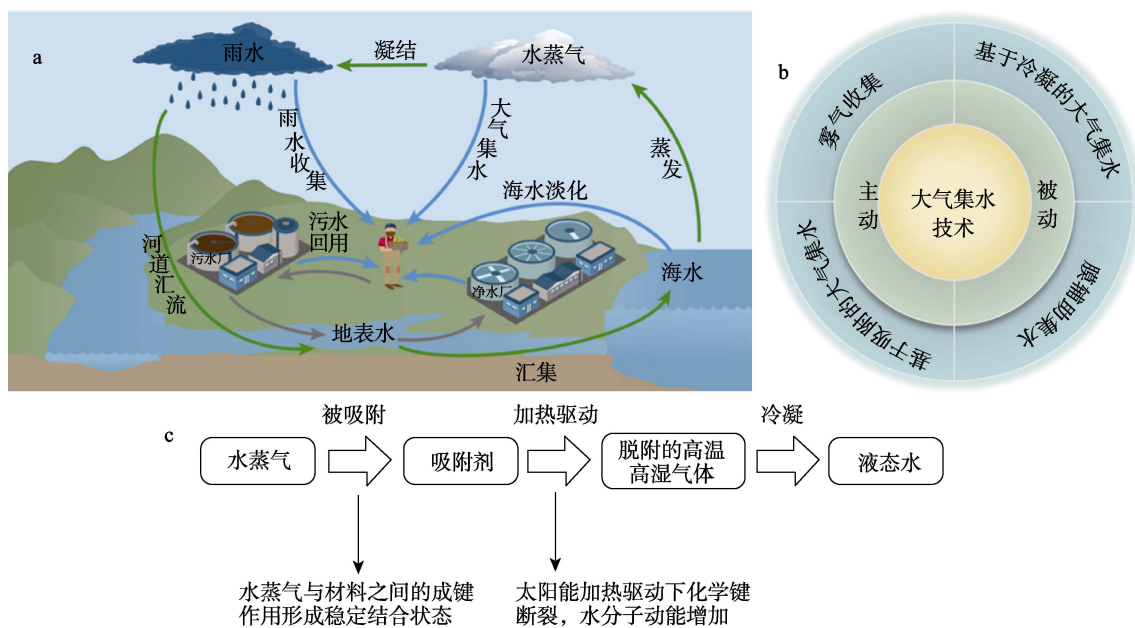


图 1 自然界水循环与人类可用的水源示意图 (a); 大气集水方式分类 (b); 基于吸附的大气集水技术典型流程示意图 (c)
Fig. 1 Schematic diagram of natural water cycle and available water sources to humans (a); Classification of atmospheric water harvesting technologies (b); Typical process of adsorption-based atmospheric water harvesting technology (c)

在 RH 较低的干旱地区,基于吸附的大气集水技术能否稳定、高效地得到优异的产水量是重要的问题,而吸附大气集水系统的性能在很大程度上取决于吸附剂的吸水能力^[14]。因此,研究适用于干旱地区的吸附剂具有重要的意义^[15]。在众多用于吸附大气集水的吸附剂中,复合吸附剂可将吸湿性盐限制在多孔基质中,与单一类型吸附剂相比,复合吸附剂在吸湿率、再生温度、吸附解吸速率、稳定性

方面具有显著的优势,在 RH 较低的干旱地区具有十分广阔的应用前景^[16]。

本文深入探讨不同集水方式的原理及其各自的优缺点,对基于吸附的大气集水技术的吸附-解吸过程进行阐述,总结该技术不同类型吸附剂的特点,对近年来复合吸附剂在大气集水领域的研究进展及优化调控策略进行系统综述;最后对大气集水吸附剂的发展前景进行展望。

1 大气集水复合吸附剂

在大气集水所用吸附剂的发展中, 最早使用天然矿物材料, 如沸石、硅胶等作为吸附剂。天然矿物材料以丰富的极性羟基和铝金属位点作为吸附中心^[17], 虽然具有一定的吸湿能力, 但其吸湿容量和再生性能有限, 尤其是在低湿度下集水效率较低^[18], 在干旱地区的应用存在较大的局限性。随着材料领域的发展, 纳米材料、多孔晶态材料、水凝胶的引入显著地提升了集水效率, 逐步突破早期的瓶颈, 实现了太阳能驱动的大气集水^[19]。为进一步提高吸附剂的综合性能, 可将吸湿盐限制在多孔材料中, 开发了一系列复合吸附剂, 提升了低 RH 下的集水量。目前, 此类复合吸附剂是集水材料研究的重要方向, 在大气集水领域具有良好的应用前景^[20]。

常见的吸附剂按照不同的吸附机制可分为物理吸附剂、聚合物水凝胶类吸附剂、复合吸附剂。不同类型的吸附剂都具有在可控条件下吸附水和解吸水的功能, 但实现此功能的方式有所不同^[21]。例如: 以金属有机框架 (MOFs) 为代表的具有物理吸附机制的多孔结构材料可将大量的水储存在孔隙中^[22]; 聚合物水凝胶类吸附剂通常由亲水性的高分子材料构成, 这些高分子材料通过物理或化学方式交联, 形成具有高孔隙度和大比表面积的三维网络结构,

为水分子提供大量的吸附和储存空间^[23]; 复合吸附剂则是将吸湿盐加入以上具有高孔隙度的材料中作为基质, 利用吸湿盐的高吸附量进行集水^[24]。不同类型吸附剂达到最佳吸湿效果的 RH 范围不同, 图 2 为一些典型吸附剂的吸附等温线^[5]。各类吸附剂依靠其独特的吸附性能, 为从大气中高效集水提供了可能。在实际的集水过程中, 吸附剂的作用机制并非单一的物理吸附和化学吸附, 而是两者的协同作用^[21]。其中, 物理吸附主要依靠范德华力, 而化学吸附则涉及更强的相互作用, 包括氢键、配位效应以及静电相互作用等^[25]。这些材料具有相应的优势与缺点, 总结如表 1 所示^[4]。

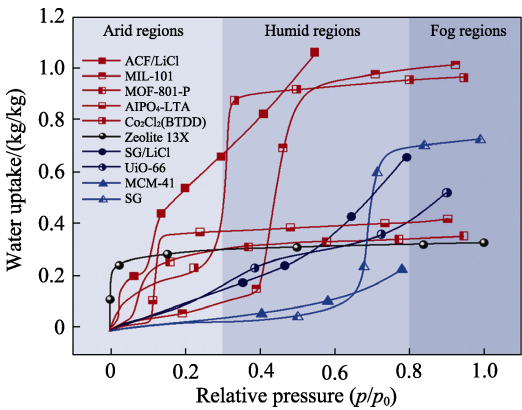


图 2 典型吸附剂的吸附等温线^[5]
Fig. 2 Adsorption isotherms of typical adsorbents^[5]

表 1 不同类型吸附剂的优缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of different types of adsorbent materials

	物理吸附剂 ^[22]	聚合物凝胶类吸附剂 ^[23]	复合吸附剂 ^[24]
代表材料	MOFs 及其衍生物 (MOF-801)	超级湿凝胶 (SMAG)	salt@matrix [LiCl@MIL-101(Cr)]
结构			
	MOF-801	SMAG	LiCl@MIL-101
特点	吸水率适中、再生温度低、快速吸附-解吸动力学、稳定性差、可调节性好	吸水率高 (高湿度下)、再生温度低、缓慢吸附-解吸动力学、稳定性好、可调节性好	吸水率高、再生温度低、快速吸附-解吸动力学、稳定性好、可调节性好
吸附等温线			
	相对压力 (p/p_0)	相对压力 (p/p_0)	相对压力 (p/p_0)

复合吸附剂引入吸湿盐后, 将吸湿盐与基质结合, 有效克服了基质的不稳定性及吸湿盐易潮解团聚的缺点, 发挥吸湿盐的优势^[26], 因此成为集水材料研究的热点。目前, 复合吸附剂中所用的吸湿盐通常为氯化钙 (CaCl₂)、溴化锂 (LiBr)

和氯化锂 (LiCl) 等, 表 2 列出常用吸湿盐的性能参数及价格^[27]。以常见的吸湿盐 LiCl 为例, 其成本低、可再生、环境友好, 具有高吸湿性和快速的吸附动力学, LiCl 在 RH<5% 的条件下只能吸附有限的水, 但当 RH 升高到 11% 以上时, 将达

到 LiCl 的潮解点, 盐将潮解形成饱和溶液, 随着 RH 的进一步升高, 最终可吸收水量 $>1000 \text{ g/g}$ ^[7]。纳米晶体 LiCl 的吸水能力可达块状 LiCl 晶体的 8

倍^[28]。同时, 它的吸湿速度较快, 可在短时间内吸收大量的水分, 因此, 成为复合吸附剂中最有潜力的吸湿盐。

表 2 典型吸湿盐的性能参数^[27]
Table 2 Performance parameters of typical hygroscopic salts^[27]

	LiCl	CaCl ₂	LiBr	Ca(NO ₃) ₂	SrBr ₂	MgSO ₄
水分子交换数/(mol/mol)	1.9~2.9	2	1.3~21.5	4	5	2
水吸附量/(g/g)	0.80~1.22	0.18	0.27~0.31	0.44	0.36	0.30
价格/(欧元/kg)	8.0	0.5	10.0	0.6	6.0	0.7

复合吸附剂的吸附过程包括物理吸附、化学吸附和溶液吸收, 并且可同时进行, 也可按顺序进行。典型的吸附过程为: 水分子首先被捕获在宿主基质的亲水多孔结构中, 然后与浸渍盐发生水化反应, 随着 RH 的增加, 形成稀释的盐溶液^[29]。水分吸附过程继续进行, 直到稀释盐溶液中的水蒸气压达到平衡。相反地, 解吸过程包括溶液的蒸发、盐的结晶、脱水和蒸气的逸出^[15]。根据复合吸附剂所选基质的不同, 可分为基于多孔晶态材料、基于碳基材料、基于聚合物凝胶等复合吸附剂。

1.1 基于多孔晶态材料的复合吸附剂

随着新型多孔材料的繁荣发展, MOFs、共价有机框架 (COFs)、氢键有机框架 (HOFs) 等高性能的多孔晶态材料广泛应用到大气集水领域中^[30], 代表性的 MOFs 材料主要有铝基 (如 MOF-303、CAU-10 和 MIL-53)^[31]、锆基 (如 MOF-801、MOF-808 和 MOF-841)^[32]及其他类型 [如 MIL-101 和 Co₂Cl₂(BTDD)]^[33]。MOFs 材料具有更大的纳米级孔体积与比表面积、坚固的孔结构和可调的化学特性, 因而是最有前途的吸附剂^[34]。而单一的 MOFs 因其典型的 S 型吸附曲线, 导致只能在较窄的湿度范围内实现高效取水^[35], 引入吸湿盐时, 其多孔骨架结构可抑制盐的潮解、减少盐的聚集、拓宽集水湿度范围、提高集水量, 有效提升了整体的吸附性能。

XU 等^[20]将 LiCl 包封在 MIL-101(Cr) 中, 制备了复合吸附剂 LiCl@MIL-101(Cr), 基质孔隙体积达 $2.0 \text{ cm}^3/\text{g}$, 可承载大量的盐; 其比表面积为 $4100 \text{ m}^2/\text{g}$, 可提供较大的反应接触面积; 孔径为 $2.9\sim 3.3 \text{ nm}$, 适合诱导 LiCl 的纳米级结晶, 且孔隙结构坚固, 具有良好的循环稳定性。在实验室规模的集水装置下, 每个周期可实现 7.0 g/g 的集水量, 在 $0.5\sim 0.8 \text{ kW/m}^2$ 的自然阳光下可实现 4.5 g/g 的集水量, 为干旱地区用自然阳光供电的高效水能利用提供了一种可行的方法。WANG 等^[36]以 1,3,5-三甲酰间苯三酚 (Tp) 和对苯二胺 (Pa-1) 为原料, 采用溶剂热法, 并将 LiCl

限制在其中, 制备了一种绿色清洁吸附剂 TpPa-1@LiCl, 将具有良好水稳定性的 β -酮胺结构的 TpPa-1 COFs 作为基质, 在 30% RH 下的吸附量为 0.37 g/g , 可实现长期稳定循环, 并且可在较大的湿度范围 ($30\%\sim 90\%$) 和较低温度 (15°C) 的高纬度干旱地区 (中国西藏地区) 表现出优异的吸附性能。

TAN 等^[37]采用原位生长法制备了具有 Cu_xS 层、Cu 层和富马酸铝 MOF 涂层的三明治状吸附剂 (Al-Fu@Cu@Cu_xS) (图 3a), 可确保 MOF 和光热涂层均匀且牢固地附着在 Cu 片上, 避免了传统粉末 MOF 颗粒易于团聚的问题。同时, 吸附剂的夹层结构 (Al-Fu 涂层和 Cu_xS 涂层分布在 Cu 片两侧) 提高了吸附剂的热传导效率, 使其在光热驱动下能够快速实现水分脱附。通过此法制备的 Al-Fu@Cu@Cu_xS 吸附剂具备优异的吸水性能和快速脱附特性, 是一种高效的大气集水材料。

上述材料的合成成本较高, 且合成步骤较为复杂, 限制了其在大气集水技术中的广泛应用。同时, 需要进一步关注材料在吸水后的稳定性和循环耐久性, 将其与其他功能材料复合, 协同结合各自的优势, 可有效解决这一问题^[38]。

1.2 基于碳基材料的复合吸附剂

碳基材料的亲水基团可高效捕获水分子^[39], 与吸湿盐协同增强吸湿效果, 将其作为复合吸附剂基质是研究的热点之一。LI 等^[40]开发了纳米碳空心胶囊包裹 LiCl 的吸附剂 HCS-LiCl (图 3b), 其可在 3 h 内从周围空气中捕获高达自身质量 100% 的水蒸气, 并在 1 kW/m^2 的阳光照射下, 在 30 min 内快速释放吸收的水。在 $15\%\sim 35\%$ 的低 RH 下, 此吸附剂能吸收大量水分, 在具有旋转圆筒集水装置的户外实验中, 获得 1.6 kg/kg 的产水量。石墨烯基材料在大气集水领域也得到应用。CAO 等^[39]探讨了氧化石墨烯 (GO) 与水分之间的相互作用以及作为吸附剂基质的潜力, 其光热性能优异, 叠层形式的层间结构具有类似多孔材料的作用, 形成的氢键网络含有可与水分子相互作用的亲水性位点。

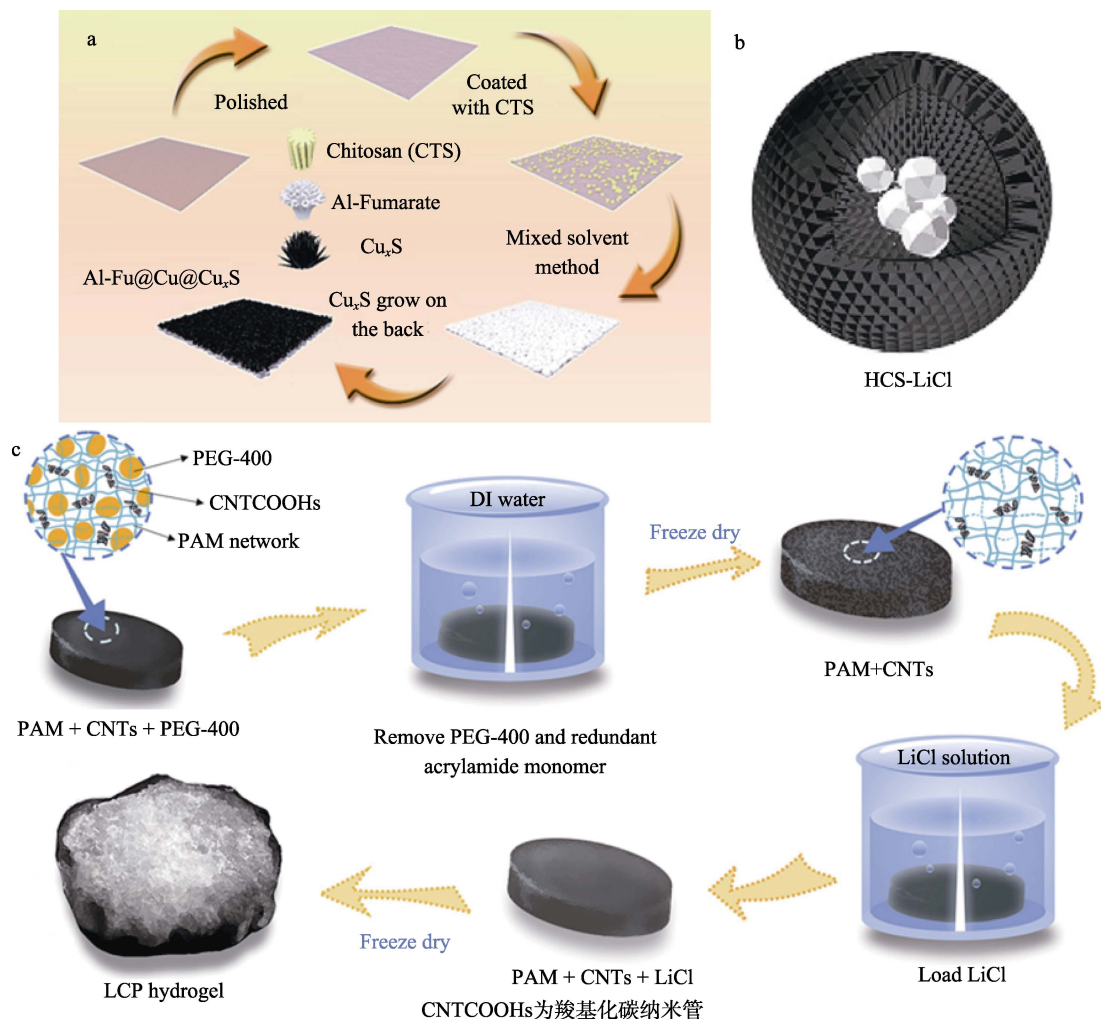


图3 原位生长法制备 $\text{Al-Fu@Cu@Cu}_x\text{S}$ 的示意图 (a)^[37]; HCS-LiCl 的结构示意图 (b)^[40]; LCP 水凝胶制备示意图 (c)^[48]
 Fig. 3 Schematic diagram of $\text{Al-Fu@Cu@Cu}_x\text{S}$ *in-situ* growth (a)^[37]; Structure diagram of HCS-LiCl (b)^[40]; Schematic diagram of fabrication process of LCP hydrogel (c)^[48]

由于含氧官能团的存在, GO 可以与多种有机交联剂进行反应, 为材料功能化提供了良好的平台, 使其形成额外的活性吸附位点。ZHAO 等^[16]将活性炭 (AC) 与 CaCl_2 研磨混合, 制备了复合吸附剂 ACL, 其在高温低湿 (35 °C、45% RH) 条件下最大吸水量可达 0.55 g/g。该研究对于干旱地区复合吸附剂的选择具有一定的参考意义, 并且材料制备方法简单, 更适用于规模化的实际应用。RAVEESH 等^[41]以可再生的木质纤维素农用甘蔗废渣为材料、KOH 为活化剂, 采用两步化学活化法, 将甘蔗渣转化为具有大比表面积和孔容的多孔活性炭 (SBAC), 用磁力搅拌器将 SBAC 浸渍在 CaCl_2 吸湿盐中, 制备了复合吸附剂 SBAC/ CaCl_2 。其具有协同增效作用, 表现出良好的吸水性、快速吸附-解吸动力学、低解吸温度 (可由太阳能驱动)、循环稳定性和储存可靠性。

目前, 利用碳基材料光热转化效率优异的特点, 将其与不同材料结合制备复合吸附剂的研究较多。

通过光热辅助释水实验进一步证实, 碳基材料是一类具有快速吸附-解吸动力学和良好稳定性的吸附剂。相关研究表明, 聚(2-丙烯酰胺基-2-甲基-1-丙磺酸) (PAMPS) 水凝胶分别掺杂 GO 和碳纳米管 (CNTs) 后, 连续光照 4 h 的表面温度分别可达 75.9、73.7 °C, 与原始 PAMPS 水凝胶 (40.3 °C) 相比, 有效提高了光热转化效率^[42]。因此, 将此类碳基材料加入水凝胶等基质中, 可有效提高能量利用效率、增强吸湿效果、强化基质的机械强度, 在光照充足的干旱、半干旱地区应用前景广阔。

1.3 基于聚合物凝胶的复合吸附剂

水凝胶是常用于复合吸附剂基质的一类低成本材料, 具有很高的吸水性 (100~1000 g/g, 以吸附剂质量计, 下同), 最低可在 32 °C 再生^[43], 并且盐溶液不易漏失^[44], 也是复合吸附剂基质的良好选择。通常用于大气集水的水凝胶材料有: 聚丙烯酰胺 (PAM)、N-异丙基丙烯酰胺 (NIPAM) 单体、聚 (N-异丙基丙烯酰胺) (PNIPAM) 和海藻酸盐等^[45]。

目前,将水凝胶材料、吸湿盐、碳基材料结合制备基于水凝胶的复合吸附剂,是研究的热点之一。

WANG 等^[43]将 LiCl 限制在 CNTs 和丙烯酰胺单体 (AM) 中,开发了一种可扩展的水凝胶基复合吸附剂 PCLG,在 45 °C、40% RH 下的吸附量为 2.55 g/g,可实现在自然阳光下取水,10 个吸附循环使用后吸附量仍能维持在第 1 次吸附量的 91%。当 PCLG 中分散有质量浓度为 0.5 g/L 的 CNTs 时,约 99% 的入射光被吸收,具有良好的吸光性和光热转化效率。通过加入光热转换效率高的材料来提高集水效率的方法是当前研究的热点。ENTEZARI 等^[46]使用二元聚合物盐 (Bina) 修饰海藻酸钠水凝胶,使盐中的 Li^+ 与 Ca^{2+} 占据海藻酸钠中 G 段与 M 段中更多的阳离子位点而增加吸附量,并与功能化 CNTs 结合,制备了 Bina/FCNT,增强了太阳光的吸收效率。所制备的 Bina/FCNT 吸附剂可吸收 5.6 g/g。ZHOU 等^[47]通过自由基聚合法制备了 PAM-CS-MXene 基质,然后在溶解和冷冻干燥后负载 LiCl,合成了 PAM-CS-MXene-LiCl 气凝胶 (CS 为壳聚糖, MXene 为二维过渡金属碳/氮化物),并作为大气集水材料。其中, PAM-MXene 聚合物链与刚性壳聚糖链结合形成交联双层网络,提高了吸湿气凝胶的韧性和机械强度, MXene 增加了对波长 240~400 nm 光的吸收。这种气凝胶在 25 °C、90% RH 下的集水量可达 5 g/g。

LYU 等^[48]采用非传统的、简单的发泡真空干燥 (PFVD) 法,制备了一种典型的 LiCl、CNTs 和 PAM 水凝胶复合的吸附剂 (LCP),成本低至 2.83 美元/kg。其制备过程示意图如图 3c 所示。首先,将 CNTs 和 PAM 溶于去离子水 (DI water),加入聚乙二醇-400 (PEG-400) 作为成孔剂,通过真空冷冻干燥,PEG-400 嵌入水凝胶网络,并形成多孔结构。随后,将该水凝胶浸泡在 LiCl 溶液中,使其吸收 LiCl,增强吸湿能力,再次进行冷冻干燥以形成更大的孔隙结构。LCP 水凝胶通过其大孔结构提供大的比表面积,使内部吸湿盐与空气充分接触。LiCl 作为吸湿剂,能在低 RH 下高效吸附水分。在 25 °C、98% RH 下, LCP 水凝胶 60 h 内最多可吸附自身质量 433.72% 的水分,并在低温 (50 °C) 下释放 99.38% 的吸附水。通过光热效应,可促进水释放,实现大气水分的高效收集。

基于聚合物凝胶的复合吸附剂凭借显著的溶胀特性,展现出卓越的吸水性能。通过多种材料的负载,水凝胶在性能上实现了全方位的提升。其成本低廉,且制备工艺简便,在大规模应用方面具有明显的优势,能更好地满足实际需求^[49]。然而,一些用于制备水凝胶的材料可能具有潜在的毒性。此外,

还需密切关注材料的临界溶液温度 (LCST) 与环境温度之间的关系,以确保材料达到最佳的溶胀效果,充分发挥其性能优势。

复合吸附剂凭借其各组分之间的协同作用,在集水性能方面具有显著的优势,远优于单一的纯材料。在此过程中,吸湿盐的含量及其特性起至关重要的作用,对吸水性能的影响尤为突出^[50]。然而,复合吸附剂在实际应用中仍面临诸多问题,如其含盐量较低,难以充分发挥吸湿盐的潜力;盐的泄漏不仅影响吸附剂的性能,还可能对基质造成腐蚀;此外,解吸效率不高也限制了其在实际应用中的效率。这些问题亟待通过进一步的研究与优化来解决。与此同时,吸湿盐与基质之间的相互作用关系也十分复杂,目前尚未得到充分的探究。深入研究这一相互作用,对优化复合吸附剂的性能,提高其在大气集水领域的应用效果具有重要意义。

2 吸附剂性能的优化调控

大气集水用吸附剂仍面临着诸多挑战,如吸附剂的吸湿性能需进一步提升,尤其在 RH<40% 的条件下;吸附剂的集水效率与解吸能耗需协同优化,保障太阳能驱动下的可持续运行;环境适应性调控机制有待加强,需根据不同的环境条件,对吸附剂进行针对性调控。这些挑战限制了吸附剂的大规模应用和可持续发展^[51]。针对上述问题,采用复合吸附剂有效地改善了吸附剂的集水性能。然而,为实现吸附性能的进一步优化与调控,必须深入研究其吸附-解吸动力学过程。吸附剂在集水过程中主要涉及吸水、储/输水和释水等步骤。根据此过程,进一步提升材料性能主要体现在增加吸附位点以提升水分捕获效率;优化孔隙结构,增大储水量、加快水分的传输速度;加快释水过程,提升产水效率。

2.1 增加吸附位点

在吸水过程中,材料表面与孔隙的极性和亲水性键,如羟基、开放的金属位点和阴阳离子等极大地影响了吸水效率,通过界面改性增加吸附位点,是目前优化吸水过程的重要方法,可使材料在较低的湿度下具有更强的亲水性和更高的吸附效率。

SOLOVYEVA 等^[52]探讨了官能团对 CAU-10-X (一种微孔 MOFs, X 为连接基中的官能团, X=H、NO₂、NH₂) 系列材料水蒸气吸附行为的影响,其阶梯状吸附等温线可能与结构变化有关,如 CAU-10-NO₂ 的 S 型吸附等温线可能与 NO₂ 官能团的弱亲水性有关, CAU-10-NH₂ 的高亲水性官能团 (NH₂ 和部分甲酰化的 NHCHO) 使其在低相对压力下具有更高的吸附量,揭示了 MOFs 的主要水吸附位点以及导致 MOFs 对水的吸附等温线呈现阶梯

式和渐变式的吸附相互作用机制, 对设计具有所需性能的 MOFs 具有重要意义。武恩宇等^[53]研发了具有高密度氧位点的一维方形孔道的铝基金属-有机框架材料 (ZJU-210), 1*H*-吡咯-2,5-二羧酸配体上的氮原子为 MOFs 孔道提供了丰富的水吸附位点, 在合适的孔道结构和丰富的水吸附位点共同作用下, ZJU-210 在 10%~20% 的低 RH 下具有极高的吸水量, 表现出良好的水蒸气捕获能力。PALASH 等^[54]通过金属离子原位掺杂调控 MOFs 材料孔隙的亲水性。结果表明, 引入 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 能够形成暴露

的高活性金属位点, 显著提升了材料的吸附性能, 并优化了 MOFs 的 S 型吸附等温线特征。同时, 掺杂过程中未导致材料的结构变形, 表明该法在保持材料结构稳定性的同时实现了吸附性能的显著提升。可控的吸附位点使材料具有良好的可调节性, 为开发高性能吸附剂提供了新的研究思路。在实际应用过程中, 可根据不同的 RH 对材料进行优化改性, 塑造适用环境的吸附等温线 (图 4a, 不涉及具体量)^[55], 从而在集水过程中展现出最佳性能。

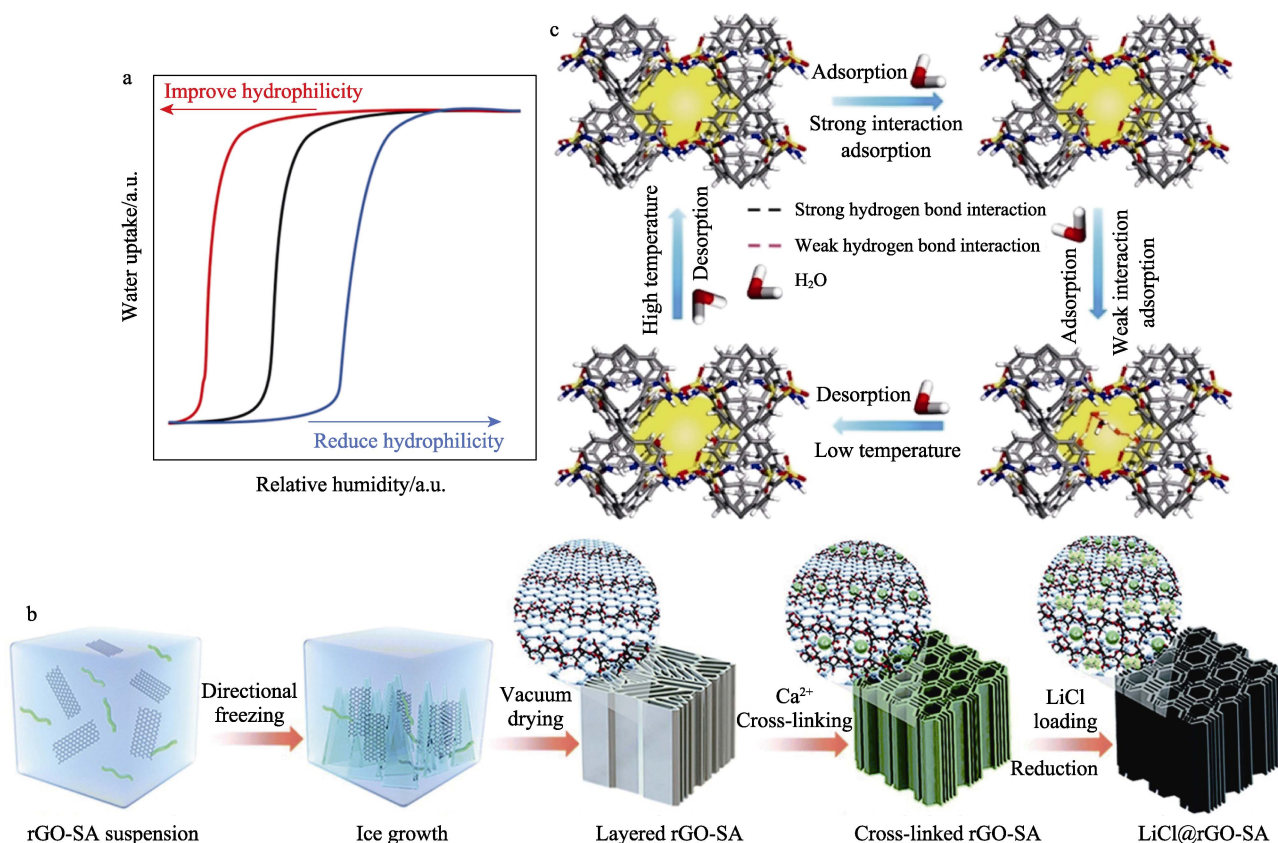


图 4 吸附剂亲水性对吸附等温线的影响 (a)^[55]; 垂直排列纳米复合吸附剂 LiCl@rGO-SA 的结构与合成路线 (b)^[62]; 双氢键体系中水分子的吸附与解吸 (c)^[64]

Fig. 4 Influence of hydrophilicity of adsorbent on its adsorption isotherm (a)^[55]; Structure and synthetic route of vertically aligned nanocomposite sorbent LiCl@rGO-SA (b)^[62]; Adsorption and desorption of water molecules in dual hydrogen bond system (c)^[64]

2.2 孔隙结构优化

水分子结合在吸附位点后, 通过孔隙填充过程形成水网络, 并不断扩展^[56], 将吸收的水分填满整个材料, 进而完成水分的储存。材料孔隙结构是关键的影响因素, 较大的孔径意味着含有更多的吸附位点, 并且可容纳更多的水分。而良好的孔隙结构可加快水的传输效率, 从而提升吸水 and 释水效率^[57]。但孔径过大时, 可能会影响材料的稳定性和低 RH 下的集水能力, 产生这种现象是因为, 大孔径增加了孔的疏水性, 从而降低了水分子的通道限制效应^[58]。

GUO 等^[59]将含有魔芋葡甘聚糖 (KGM)、羟

丙基纤维素 (HPC) 和 LiCl 的凝胶前体充分混合, 在不使用任何化学交联剂或引发剂的条件下, 采用浇铸法使其迅速发生凝胶化, 冷冻干燥后合成了超吸湿聚合物膜 (SHPF)。利用 KGM 使其形成具有 20~50 μm 微孔的粗糙表面, 增大了空气和材料的接触面积, 使其进行主动的水分捕获和水蒸气传输。此外, KGM 和 HPC 形成的网络结构抑制了水化过程中吸湿盐颗粒的聚集, 从而使其具有显著的吸水性和稳定的循环性能。SONG 等^[60]依据密度泛函理论 (DFT) 建模提出, 具有 40% 吸附位点密度和约 1.0 nm 孔径的纳米多孔碳的扩散阻力最小, 适合作

为水蒸气的快速扩散通道。由此通过蒸汽选择性蚀刻的策略制备了大孔隙金属有机骨架衍生的纳米多孔碳,热水蒸气可通过水气反应选择性地蚀刻碳原子,以加宽纳米孔,并精细控制微孔尺寸。同时,蒸汽蚀刻未改变材料的吸附位点,因而不会降低其表面的亲水性。复合吸附剂主要依靠孔隙中吸湿盐的水合作用吸水,孔隙结构的优化对其性能提升也尤为重要^[61]。XU 等^[62]通过定向冰晶生长和真空干燥的方式合成了上下贯通、具有垂直排列结构的还原氧化石墨烯-海藻酸钠(rGO-SA)基质,再将 LiCl 限制在其中,合成了 LiCl@rGO-SA 复合吸附剂(图 4b)。由于水蒸气在吸附剂中的扩散主要沿垂直方向进行移动,因此,多孔基质的这种一维孔结构的设计在负载大量吸湿盐的同时,具有快速的吸附-解吸动力学。与其他多孔材料不同,水凝胶的比表面积相对较小,但其柔性结构赋予其独特的吸水性能。当水凝胶吸水后,其孔径会不断扩大,从而实现较高的吸水率。通过优化水凝胶的结构,如调节表面粗糙度和褶皱程度^[63],可进一步提升其吸水率。总之,孔径大小通过改变孔体积来影响吸水率,但在材料制备过程中,应避免过度追求更大孔径而导致性能下降。

2.3 加快释水过程

解吸过程即吸附的逆过程,包括水分从材料中蒸发以及产生液态水。因此,在增强水分子与材料之间结合能,从而提升材料吸水效果的同时,不可避免地会使材料解吸需要的能量大大提升,从而导致解吸效果不佳,进而整个集水过程受到影响。碳基材料的复合是通过加强光热转化能力来提高输入的解吸能量,但这种方法对外界的依赖性较强,光照不足时解吸将受到严重的影响。

ZHANG 等^[64]制备了一种可实现快速解吸的结晶多孔有机盐(CPOS-6)材料,其具有独特的双氢键系统(强氢键和弱氢键)(图 4c),在低 RH 下,水分子优先与强极性基团形成强氢键,从而实现快速吸附;在高 RH 下,后续的水分子主要与其他水分子形成弱氢键,这种弱相互作用使得水分子在解吸时更容易释放,从而降低了解吸所需的能量。与碳基材料类似,CHEN 等^[65]研究了一种光热电桥技术,通过在导热的镍网上原位生长 Ni₃S₂ 颗粒,形成 Ni-Ni₃S₂ 光热桥,增强了热传递效率,使材料可在 40 min 内完全脱附。这种方法展示了在光照不足地区的应用潜力。NIE 等^[66]制备了具有 16 环孔道磷酸铝分子筛的 DNL-11 材料,其在极端干旱条件下展现出优异的集水性能,在释水过程中采用氮气吹扫法,可有效去除水化 DNL-11 中 82% 的水分,剩余的水分子也可在随后的加热过程中完全解吸。此外,

通过对临界溶液温度(LCST)的改变,可使材料在特定的温度范围内更好地适应不同的环境条件和应用需求。GUAN 等^[67]将天然多糖进行功能化改性,降低了解吸温度。改性过程从烷基化开始,接枝羟丙基(HP)、羟丁基(HB)等热响应基团,以提高水溶性,并赋予较低的 LCST,温度诱导的疏水相互作用有助于在较低的解吸温度下释放水分子。解吸过程是决定能否实现太阳能驱动的大气集水的关键,因此,需要平衡吸附与解吸能量之间的关系,在具有高吸水率的同时保证解吸的顺利进行。

综上所述,宏观吸水性能本质上由微观吸水机制主导,而吸水、储/输水与释水过程之间存在复杂的动态耦合关系,共同决定了吸附剂的综合性能表现。通过对吸附剂的优化调控,可进一步突破材料的性能瓶颈,同时需要考虑实际应用场景的环境条件,从而选择相应的吸附剂以达到最佳效果。然而,仅依赖吸附剂本身的优化,对整体集水性能的提升是有限的,未来研究需进一步优化吸附剂与装置设计的匹配性^[68],并与运行模式协同适配,实现从材料到系统的性能全面提升。

3 结束语与展望

大气集水技术在近十年的发展中取得了显著的成果,为解决缺水地区用水问题提供了可行的解决方案,对干旱地区、离网地区和紧急条件下获取饮用水具有重要的研究意义和应用价值。中国作为人均水资源量匮乏的国家之一,面临着严峻的水资源短缺的挑战。在此背景下,非常规水源的开发利用受到了前所未有的重视。大气集水技术以独特的优势和巨大的发展潜力,有望成为一种极具前景的非常规水源,为中国可持续发展提供坚实的水资源保障。目前,大气集水领域相关产业已初具形态,石墨烯光热材料、纳米级材料等已实现了工业化生产,相关高新技术企业推出了针对不同市场的消费级产品。然而,一些关键性问题仍制约着大气集水领域的发展,未来应持续推进相关政策的出台,建立以安全、稳定、经济为主的商业化评价标准,鼓励跨学科融合发展,进一步促进大气集水技术的产业化进程,并从以下 4 个方面进行深入研究:

(1) 进一步提升材料在低 RH 下的集水能力,是未来发展的关键。应深入探究吸附剂在分子及原子层面的作用机制,通过吸附剂的创新设计与优化调控策略,提升吸附剂的综合性能。例如:开发“分子-孔隙-器件”多尺度协同设计的新型复合吸附剂,探索仿生结构(甲壳虫结构、蜘蛛丝)对集水效率的提升。

(2) 在推进吸附剂研发与改进的同时,关注出水水质安全问题同样重要。部分吸附剂的潜在毒性和复杂的大气污染场景(存在PM 2.5颗粒物、重金属离子和有机污染物等)对终端出水水质的影响有待进一步探讨。针对此类问题,一方面可以在集水系统末端配置水处理模块,另一方面应研发对污染物具有净化与降解功能的吸附剂,形成“集水-净水”一体化解决方案。

(3) 大气集水吸附剂在未来需突破实验室制备技术的瓶颈,针对规模化应用的需求开发高效率、低成本、连续化的制备工艺。深入探索集水效果与制备方式之间的构效关系,通过工艺的优化革新构建可控的制备技术体系,从而进一步推动大气集水技术的产业化进程。

(4) 大气集水技术未来应趋向于集成化与智能化发展。研发材料-装置-运行控制集成的一体化集水设备,在此基础上,融合物联网与人工智能技术,对大气集水系统进行智能化管理,如材料智能筛选与耐久性检测预警、运行模式的自动控制和出水水质的实时监测等,从而保障大气集水系统的稳定、可靠与高效运行。

参考文献:

- [1] LI Q Q, YE A Z, WADA Y, *et al.* Climate change leads to an expansion of global drought-sensitive area[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130874.
- [2] ZHANG M B, LIU R B, LI Y X. Diversifying water sources with atmospheric water harvesting to enhance water supply resilience[J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): 7783.
- [3] CENDOYA A, CUEVAS C, WAGEMANN E. Numerical evaluation of a hybrid atmospheric water harvesting system for human consumption[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 56: 104464.
- [4] BAI Z Y, WANG P F, XU J X, *et al.* Progress and perspectives of sorption-based atmospheric water harvesting for sustainable water generation: Materials, devices, and systems[J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(5): 671-687.
- [5] TU Y D, WANG R Z, ZHANG Y N, *et al.* Progress and expectation of atmospheric water harvesting[J]. *Joule*, 2018, 2(8): 1452-1475.
- [6] KLEMM O, SCHEMENAUER R S, LUMMERICH A, *et al.* Fog as a fresh-water resource: Overview and perspectives[J]. *AMBIO-A Journal of the Human Environment*, 2012, 41(3): 221-234.
- [7] ZHU W K, ZHANG Y, ZHANG C, *et al.* Radiative cooling sorbent towards all weather ambient water harvesting[J]. *Communications Engineering*, 2023, 2(1): 35.
- [8] BERGMAIR D, METZ S J, DE LANGE H C, *et al.* System analysis of membrane facilitated water generation from air humidity[J]. *Desalination*, 2014, 339: 26-33.
- [9] ZENG W T, YOU T, WU W. Passive atmospheric water harvesting: Materials, devices, and perspectives[J]. *Nano Energy*, 2024, 125: 109572.
- [10] NIKKHAH H, AZMI W M B W, NIKKHAH A, *et al.* A comprehensive review on atmospheric water harvesting technologies: From thermodynamic concepts to mechanism and process development[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53: 103728.
- [11] SADEK S, DENG S, ZHAO J, *et al.* Solar-powered adsorption-based atmospheric water harvesting systems: Principles, materials, performance analysis, and configurations[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 54: 102874.
- [12] LI R Y, WANG P. Sorbents, processes and applications beyond water production in sorption-based atmospheric water harvesting[J]. *Nature Water*, 2023, 1(7): 573-586.
- [13] LIU X M, XU X Q, XU R N, *et al.* Preparation and properties of a metal-organic frameworks polymer material based on Sa-son seed gum capable of simultaneously absorbing liquid water and water vapor[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 269: 132158.
- [14] LI J Y (李吉焱), XING G Y (邢郭宇), QIAO M (焦敏), *et al.* Exploration, optimization and breakthrough in application of adsorption-based atmospheric water harvesting technology[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2024, 41(9): 1877-1886, 1897.
- [15] LU W H, ONG W L, HO G W. Advances in harvesting water and energy from ubiquitous atmospheric moisture[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(24): 12456-12481.
- [16] ZHAO H, ZHANG B, GAO Y, *et al.* Experimental study on the adsorption and desorption performance of composite adsorbent activated carbon/calcium chloride[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(5): 5585-5596.
- [17] WANG M L, LIU E K, JIN T, *et al.* Towards a better understanding of atmospheric water harvesting (AWH) technology[J]. *Water Research*, 2024, 250: 121052.
- [18] BAGHERI F. Performance investigation of atmospheric water harvesting systems[J]. *Water Resources and Industry*, 2018, 20: 23-28.
- [19] WANG J Y, LIU J Y, WANG R Z, *et al.* Experimental research of composite solid sorbents for fresh water production driven by solar energy[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 121: 941-950.
- [20] XU J X, LI T X, CHAO J W, *et al.* Efficient solar-driven water harvesting from arid air with metal-organic frameworks modified by hygroscopic salt[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(13): 5202-5210.
- [21] GAO S W, WANG Y, ZHANG C, *et al.* Tailoring interfaces for atmospheric water harvesting: Fundamentals and applications[J]. *Matter*, 2023, 6(7): 2182-2205.
- [22] XU W T, YAGHI O M. Metal-organic frameworks for water harvesting from air, anywhere, anytime[J]. *ACS Central Science*, 2020, 6(8): 1348-1354.
- [23] ZHANG Y S, KHADEMHOSEINI A. Advances in engineering hydrogels[J]. *Science*, 2017, 356(6337): eaaf3627.
- [24] YU N, WANG R Z, WANG L W. Sorption thermal storage for solar energy[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, 39(5): 489-514.
- [25] SHAN H, LI C F, CHEN Z H, *et al.* Exceptional water production yield enabled by batch-processed portable water harvester in semi-arid climate[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5406.
- [26] YANG C X (杨晨曦), ZHANG H O (张海欧). Research progress in the preparation and application of adsorption type atmospheric water harvesting materials[J]. *Advances in Material Chemistry (材料化学前沿)*, 2023, 11(3): 57-62.
- [27] FRAZZICA A, BRANCATO V, CAPRÌ A, *et al.* Development of "salt in porous matrix" composites based on LiCl for sorption thermal energy storage[J]. *Energy*, 2020, 208: 118338.
- [28] PRAKASH A, KATIYAR N K, SUAREZ-VILLAGRAN M Y, *et al.* Effects of size on water vapour absorption and regeneration in lithium chloride nanocrystals[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 36: 106388.
- [29] WANG Y, GAO S W, ZHONG H M, *et al.* Heterogeneous wettability and radiative cooling for efficient deliquescent sorbents-based atmospheric water harvesting[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2022, 3(5): 100879.
- [30] LI J H, WANG Y, CHEN Y, *et al.* Round-the-clock water harvesting

- from dry air using a metal-organic framework[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, 49: 170-177.
- [31] HANIKEL N, PRÉVOT M S, FATHIEH F, *et al.* Rapid cycling and exceptional yield in a metal-organic framework water harvester[J]. *ACS Central Science*, 2019, 5(10): 1699-1706.
- [32] KIM H, RAO S R, KAPUSTIN E A, *et al.* Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1191.
- [33] HU Y, YE Z Z, PENG X S. Metal-organic frameworks for solar-driven atmosphere water harvesting[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139656.
- [34] KIM H, YANG S, RAO S R, *et al.* Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight[J]. *Science*, 2017, 356(6336): 430-434.
- [35] WEI Y S (魏源送), WU Q Y (吴其洋), ZHENG L B (郑利兵). Research progress on metal-organic frameworks (MOFs) for atmosphere water harvesting[J]. *Environmental Chemistry (环境化学)*, 2024, 43(3): 751-764.
- [36] WANG Y X, CHEN W, FU J C, *et al.* Efficient air water harvesting of TpPa-1 COFs@LiCl composite driven by solar energy[J]. *eScience*, 2023, 3(4): 100154.
- [37] TAN Y X, CHEN W C, FANG Y T, *et al.* Sandwich-like adsorbent based on Al-fumarate MOF coating on Cu@Cu₂S sheet for rapid solar-driven atmospheric water harvesting[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146353.
- [38] TIAN G Y, FU C H, GUO Z G. Metal-organic framework-based composite adsorbents for atmospheric water harvesting: Materials and devices[J]. *Materials Today*, 2025, 83: 307-330.
- [39] CAO Z J, WEN X Y, QUINTANO V, *et al.* On the role of functionalization in graphene-moisture interaction[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2023, 27(6): 101122.
- [40] LI R Y, SHI Y, WU M C, *et al.* Improving atmospheric water production yield: Enabling multiple water harvesting cycles with nano sorbent[J]. *Nano Energy*, 2020, 67: 104255.
- [41] RAVEESH G, GOYAL R, TYAGI S K. Sugarcane bagasse derived composite sorbent for sorption based atmospheric water harvesting [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 356: 129820.
- [42] FENG A, SHI Y H, ONGGOWARSITO C, *et al.* Structure-property relationships of hydrogel-based atmospheric water harvesting systems[J]. *ChemSusChem*, 2024, 17(11): e202301905.
- [43] WANG J Y, DENG C H, ZHONG G D, *et al.* High-yield and scalable water harvesting of honeycomb hygroscopic polymer driven by natural sunlight[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2022, 3(7): 100954.
- [44] MISHRA A K, WALLIN T J, PAN W, *et al.* Autonomic perspiration in 3D-printed hydrogel actuators[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(38): eaaz3918.
- [45] LYU T, HAN Y X, CHEN Z J, *et al.* Hydrogels and hydrogel derivatives for atmospheric water harvesting[J]. *Materials Today Sustainability*, 2024, 25: 100693.
- [46] ENTEZARI A, EJEIAN M, WANG R Z. Super atmospheric water harvesting hydrogel with alginate chains modified with binary salts[J]. *ACS Materials Letters*, 2020, 2(5): 471-477.
- [47] ZHOU Z L, WANG G H, PEI X J, *et al.* Solar-powered MXene biopolymer aerogels for sorption-based atmospheric water harvesting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 425: 138948.
- [48] LYU T, WANG Z Y, LIU R N, *et al.* Macroporous hydrogel for high-performance atmospheric water harvesting[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(28): 32433-32443.
- [49] EHTISHAM M, SAEED-UL-HASSAN M, POATER A. A comprehensive review of approaches, systems, and materials used in adsorption-based atmospheric water harvesting[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 958: 177885.
- [50] ANSARI E, FERBER N L, MILOŠEVIĆ T, *et al.* Atmospheric water generation in arid regions-A perspective on deployment challenges for the Middle East[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49: 103163.
- [51] LI Q, SHAO Z, ZOU Q H, *et al.* An atmospheric water harvesting system based on the "optimal harvesting window" design for worldwide water production[J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(10): 1437-1447.
- [52] SOLOVYEVA M V, SHKATULOV A I, GORDEEVA L G, *et al.* Water vapor adsorption on CAU-10-X: Effect of functional groups on adsorption equilibrium and mechanisms[J]. *Langmuir*, 2021, 37(2): 693-702.
- [53] WU E Y (武恩宇), QIAN G D (钱国栋), LI B (李斌). Water adsorption in aluminum-based metal-organic framework for atmospheric water harvesting[J]. *Journal of Zhejiang University (浙江大学学报)*, 2022, 56(1): 186-192.
- [54] PALASH M L, JAHAN I, RUPAM T H, *et al.* Novel technique for improving the water adsorption isotherms of metal-organic frameworks for performance enhancement of adsorption driven chillers[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2020, 501: 119313.
- [55] ZHANG S, FU J R, XING G L, *et al.* Recent advances in porous adsorbent assisted atmospheric water harvesting: A review of adsorbent materials[J]. *Chemical Synthesis*, 2023, 3(2): 10.
- [56] ZHONG Y, ZHANG L N, LI X Y, *et al.* Bridging materials innovations to sorption-based atmospheric water harvesting devices [J]. *Nature Reviews Materials*, 2024, 9(10): 681-698.
- [57] LIU X Y, WANG W W, XIE S T, *et al.* Performance characterization and application of composite adsorbent LiCl@ACFF for moisture harvesting[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 14412.
- [58] TAN K T, TAO S S, HUANG N, *et al.* Water cluster in hydrophobic crystalline porous covalent organic frameworks[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6747.
- [59] GUO Y H, GUAN W X, LEI C X, *et al.* Scalable super hygroscopic polymer films for sustainable moisture harvesting in arid environments[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2761.
- [60] SONG Y, XU N, LIU G L, *et al.* High-yield solar-driven atmospheric water harvesting of metal-organic-framework-derived nanoporous carbon with fast-diffusion water channels[J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17(8): 857-863.
- [61] YANG K J, PAN T T, PINNAU I, *et al.* Simultaneous generation of atmospheric water and electricity using a hygroscopic aerogel with fast sorption kinetics[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105326.
- [62] XU J X, LI T X, YAN T S, *et al.* Ultrahigh solar-driven atmospheric water production enabled by scalable rapid-cycling water harvester with vertically aligned nanocomposite sorbent[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(11): 5979-5994.
- [63] NANDAKUMAR D K, ZHANG Y X, RAVI S K, *et al.* Solar energy triggered clean water harvesting from humid air existing above sea surface enabled by a hydrogel with ultrahigh hygroscopicity[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(10): 1806730.
- [64] ZHANG S, FU J R, DAS S, *et al.* Crystalline porous organic salt for ultrarapid adsorption/desorption-based atmospheric water harvesting by dual hydrogen bond system[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(40): e202208660.
- [65] CHEN W C, LIU Y X, XU B L, *et al.* Enhancing atmospheric water harvesting of MIL-101 (Cr) MOF sorbent with rapid desorption enabled by Ni—Ni₃S₂ photothermal bridge[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(52): 2410999.
- [66] NIE C Y, YAN N N, LIAO C Y, *et al.* Unraveling a stable 16-ring aluminophosphate DNL-11 through three-dimensional electron diffraction for atmospheric water harvesting[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(15): 10257-10262.
- [67] GUAN W X, ZHAO Y X, LEI C X, *et al.* Molecularly functionalized biomass hydrogels for sustainable atmospheric water harvesting[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(22): 2420319.
- [68] LAPOTIN A, ZHONG Y, ZHANG L N, *et al.* Dual-stage atmospheric water harvesting device for scalable solar-driven water production[J]. *Joule*, 2021, 5(1): 166-182.