

太阳能驱动大气集水：进展与展望

李吉焱, 邢郭宇, 景艳菊, 刘美辰, 孙寒雪

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 受太阳能界面蒸发和被动辐射冷却启发的太阳能驱动大气集水 (SAWH), 以绿色和可持续的方式产生淡水, 具有不受地域限制的优势, 在解决淡水资源危机方面具有巨大的潜力。近年来, 为更好地实现 SAWH 的应用, 研究人员对 SAWH 的核心部件——吸湿材料不断地进行优化, 开发出吸湿盐类、沸石类、硅胶类、金属-有机框架 (MOFs) 类、复合材料类等吸湿材料, 同时对集水装置进行设计和改进, 取得了新的进展。该文对 SAWH 技术进行全面的回顾, 梳理了适用于 SAWH 应用的不同吸湿材料, 并对吸湿材料的性能进行了比较。分析了不同 SAWH 系统, 讨论了在不同气候条件下集水系统的潜在应用, 并对这一技术的发展方向进行了展望。

关键词: 太阳能驱动大气集水; 吸湿材料; 吸湿盐; 沸石; 硅胶; MOFs; 集水装置

中图分类号: TK519; TB34 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2023) 06-1214-11

Solar-driven atmospheric water harvesting: Progress and prospect

LI Jiyan, XING Guoyu, JING yanju, LIU Meichen, SUN Hanxue

(School of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Solar-driven atmospheric water harvesting (SAWH), inspired by solar interface evaporation and passive radiation cooling, shows great potential in solving the crisis of freshwater resources with the advantage of producing freshwater in a green and sustainable manner and being free from geographical constraints. In recent years, in order to better realize the application of SAWH, researchers have been continuously optimizing the moisture absorption materials, the core component of SAWH technology, and developed a variety of moisture absorption materials such as moisture absorption salts, zeolites, silica gels, and metal-organic frameworks (MOFs), and composite materials. At the same time, new progress has been achieved in the design and improvement of water gathering devices. Herein, SAWH technology was comprehensively reviewed, and different moisture absorption materials suitable for SAWH were presented along with detailed summarization of their properties. Meanwhile, different SAWH water collection systems were analyzed, and their potential applications under different climatic conditions were discussed. Finally, the future development directions of SAWH technology was prospected.

Key words: solar-driven atmospheric water harvesting; moisture absorption materials; hygroscopic salts; zeolite; silica gel; MOFs; water collection device

清洁淡水的缺乏是目前最普遍的全球性问题, 全球有超过三分之一的人口生活在淡水资源紧缺的国家或地区^[1]。在解决水资源短缺这一问题上, 太阳能驱动大气集水 (SAWH) 已成为一种很有前途的策略, 该技术在如今及未来的持续发展中, 有望为 10 亿人提供安全的饮用水^[2]。而从环境空气中

获取水的方法主要有两种: 直接冷凝法和材料吸附法, 其中直接冷凝法需要消耗大量的能量, 且具有地域局限性^[3], 而材料吸附法在解吸过程中同样存在耗能大的问题。受太阳能界面蒸发和被动辐射冷却启发的 SAWH 不受地域限制, 利用太阳光提供能源, 以绿色和可持续的方式从大气中捕获水分产生

淡水, 在解决淡水资源危机方面具有巨大的潜力。

SAWH 的基本原理是使用吸湿材料自发地收集大气中的水, 并将其储存在材料内部, 有效地利用太阳光产生热量并作为驱动力促进吸湿材料内水蒸气的释放, 最后将水蒸气通过直接冷凝或其他技术手段转变成液滴, 完成大气中水分的收集。目前, 太阳能光热蒸发技术进展飞速^[4], 具有优异性能的光热材料层出不穷, 如金属纳米粒子、碳材料、聚合物等^[5]。此外, 界面蒸发技术在水处理领域也具有良好的应用前景, 在净水、杀菌等方面发挥着不可或缺的作用^[6], 运用此技术或许会大大提高解吸水的质量, 使解吸出来的水所含金属离子等参数均达到国家规定饮水要求。基于此, SAWH 的发展有望得到更大范围的推广, 并应用到生活实际中。

SAWH 的核心部件是吸湿材料, 研究人员一直致力于高效吸湿材料的开发设计。通过梳理 SAWH 的研究现状, 不难发现, 理想的吸湿材料应具备以下特点: (1) 吸水率高、释水能量低、集水-释水速率快; (2) 循环稳定性高、工艺简单、廉价、环保、易于规模化生产; (3) 宽带的光吸收。基于上述要点, 研究者对吸湿材料不断优化, 同时对集水装置进行设计和改进, 以更好地实现 SAWH 的应用。然而, SAWH 在实际应用中的性能仍然不能令人满意。

针对 SAWH 存在的问题, 本文在延续前人研究的基础上, 梳理了适应于 SAWH 应用的不同吸湿材料, 并对材料的性能进行了比较。分析了不同的 SAWH 系统, 讨论了在不同气候条件下集水系统的潜在应用, 并对这一技术的发展方向进行了展望, 为实现 SAWH 的应用推广提供理论指导和技术支持 (图 1)。

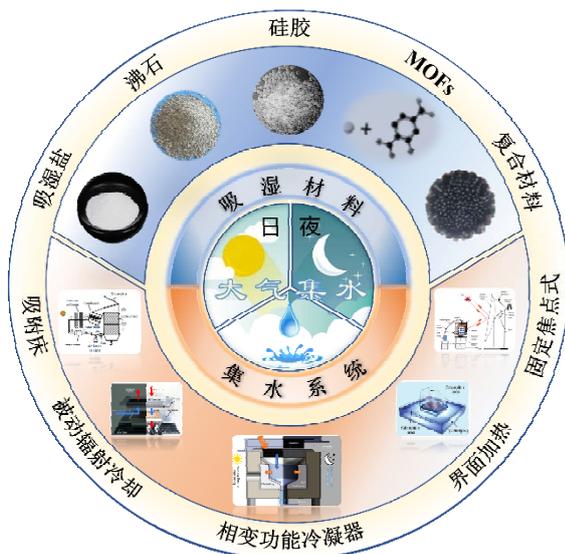


图 1 SAWH 的研究现状解析图^[7-13]

Fig. 1 Analysis diagram of research status for SAWH^[7-13]

1 基于 SAWH 开发的吸湿材料

吸湿材料在从环境空气中吸收水分的过程中发生物理^[14-16]或化学^[17-18]变化, 其在基于 SAWH 技术上充当着极其重要的角色, 太阳能驱动蒸发即利用光热转换材料将太阳能转化为热量, 然后热量传递到吸湿材料中以达到吸附水的解吸条件, 从而使吸附水释放出来。简而言之, 就是有效地利用太阳光产生热量来解吸吸湿材料中的吸附水进行大气集水。吸湿材料本身的吸湿性能对 SAWH 最终的产水效率影响重大^[19]。因此, 寻找吸水倍率高、解吸消耗能小的亲水材料是学术界共同追求的目标。不难发现, 材料的垂直孔道结构与孔隙率、亲水性官能团与数目、比表面积与材料吸湿能力之间存在一定的关系。材料的比表面积越大, 材料表面的亲水性官能团或内部的活性位点与空气中水分接触的越充分, 因此, 大的比表面积将大大提高材料的吸湿能力; 亲水官能团数目越多, 结合的水越多, 吸湿能力越强; 孔隙率越大, 互相连通的开孔越多, 越有利于水分在材料内部的储存与运输, 水分的及时扩散为其进一步吸附提供了便利。此外, 垂直的孔道结构使外表面捕获的水分子迁移距离变短, 减少了与孔隙壁的黏性摩擦, 并减少了运动中的水分子之间的碰撞, 顺应水分子的自然迁移, 有利于增强水蒸气从材料表面向内部的扩散, 有效提高吸湿效果。目前, 具有代表性吸附材料可分为吸湿盐类、沸石类、硅胶类、金属-有机框架 (MOFs) 类、复合材料类等。

1.1 吸湿盐类材料

吸湿盐具有优异的吸水性能和相对较低的成本, 吸湿材料中应用广泛。如将吸湿盐做成颗粒状, 放在衣柜中可用作除湿剂。吸湿盐的吸湿是基于水合过程, 水化以固-固相变的形式进行^[20]。根据盐类金属阳离子的不同, 吸湿盐类材料主要包括钙盐、锂盐、钠盐、钾盐、镁盐、铜盐等。

1.1.1 钙盐吸湿材料

钙盐具有成本低的优势, 但其溶解性差, 长期使用易出现结晶现象, 阻碍其进一步吸湿, 这是钙盐普遍存在的不足之处。溶解性钙盐主要有 CaCl_2 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{HCOO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。VAINIO 等^[21]测试出 CaCl_2 可吸收的水分约高达自身物质的量的 10 倍 (体积分数为 30% 的水蒸气), 但解吸条件高, 温度必须升高到 155~165 °C 才能再结晶形成无水 CaCl_2 。若仅靠太阳能作为唯一能源输入, 达到该解吸温度仍有一定难度。ELASHMAWY 等^[22]使用浸有质量分数为 30% 的 CaCl_2 溶液的棉布作为吸湿剂, 吸附饱和后干燥剂质量分数为 56.62%, 水产量可达

0.51 L/kg。Ca(NO₃)₂ 在干燥条件下形成无定形水合物 Ca(NO₃)₂•4H₂O^[23]，在相对湿度 (RH) 为 80%~90% 范围内，Ca(NO₃)₂ 呈现出逐渐吸湿的状态，吸湿生长因子虽仅为 1.5~1.8，但没有发生迅速的潮解^[24]。在 25 °C 下，当 RH 从 0 增加到 95% 时，Ca(HCOO)₂•H₂O 的质量大幅增加，几乎增加了 6 倍，但遗憾的是，研究发现，Ca(HCOO)₂•H₂O 的质量只有在相对湿度从 90% 增加到 95% 时才有较大的增加，说明 Ca(HCOO)₂•H₂O 只有在较高湿度范围才具有极强的吸湿能力^[25]。总的来说，以上 3 种钙盐在 SAWH 的实际应用中都存在不足，并且 Ca(NO₃)₂、Ca(HCOO)₂•H₂O 有可能对集水装置造成一定程度的腐蚀以及存在一定的实验安全性问题。目前，运用 SAWH 的钙盐仍只是 CaCl₂，但 CaCl₂ 解吸条件高，因此，基于钙盐的吸湿材料开发空间巨大。

1.1.2 锂盐吸湿材料

锂盐吸湿材料中主要用 LiCl^[26]、LiBr^[27] 两种。LiCl 是目前已报道的吸湿盐中吸湿性最强的一种，而且价格低廉、应用潜力大。SRIVASTAVA 等^[28]将沙子作为基质材料，初始质量分数为 37% 的 LiCl 可快速吸收大气及基质中的水分，实验期间吸收的水分为 125 g，且每天能产生约 90 mL/kg 的水。但是，LiCl 会产生潮解，导致在吸水/脱水循环期间出现结块、腐蚀和膨胀问题^[29]。根据水蒸气吸附/解吸等压线可以发现，LiCl 具有较大的吸附/解吸滞后^[30]，同一相对蒸气压下，吸附时的吸着水量低于解吸时的吸着水量，这是因为，当 LiCl 吸收了大量水分时，浓缩的 LiCl 溶液的高蒸发焓会阻碍水的释放，从而需要消耗更多的能量来进行解吸^[31]。因此，为了缓解以上问题，LiCl 一般添加在硅胶、水凝胶等主体材料中使用，而不能直接用于吸湿。

1.1.3 其他吸湿盐材料 (钠盐、钾盐、镁盐、铜盐)

除了最常用的锂盐与钙盐，吸湿盐类还有钠盐、钾盐、镁盐、铜盐等。ZHANG 等^[32]综合表征了含钠和钾盐的吸湿性，并测量了 6 种典型的含钠和含钾盐 (NaCl、KCl、NaNO₃、KNO₃、Na₂SO₄、K₂SO₄) 的吸湿生长曲线，结果表明，以上几种盐在 RH < 80% 的环境下几乎不吸水，只能在极高湿度的环境中表现出吸湿性。GUO 等^[25]测量了含镁盐的吸湿性，其中包括硝酸盐、氯化盐、甲酸盐和醋酸盐，结果发现，在 90% RH 下，4 种含镁盐的吸湿生长因子的变化很小，说明相比于钙盐和锂盐，镁盐的吸湿效果较差。而 LI 等^[33]认为，无水盐与 SAWH 结合具有很大的潜力，并从常见的无水和含水盐中筛选出 CuCl₂、CuSO₄ 和 MgSO₄，并将其作为集水系统具有前景的盐，结果表明，3 个盐装置的整体性能在 10 次循环后仍保持稳定。

综合比较来看，目前最常用的吸湿盐为 CaCl₂ 和 LiCl，其中 LiCl 吸湿性能最好。根据吸湿盐易潮解和风化的特点，使用前应存放于干燥低温的环境下，尽量避免长时间的运输，以免造成吸湿效果变差或吸湿盐本身形状的损坏。从 SAWH 的角度来看，若最终想要获得较高的产水率，仅仅使用单一吸湿盐是不可行的，虽然其在相对较低湿度下表现出较高的吸水率，但需要输入高能量来释放水分；且在循环期间盐颗粒的聚集也可能导致吸收动力学缓慢，性能下降，腐蚀设备，甚至部分吸湿盐难以再次循环使用，上述问题限制了单一吸湿盐在 SAWH 中的实际应用，因此需要开发性能更优异的复合吸湿材料。

1.2 沸石类吸湿材料

沸石是一种含有结晶水的碱金属或碱土金属的铝硅酸盐矿物，拥有较大内比表面积以及多个孔道结构，以丰富的铝金属位点作为水吸附中心^[34]。沸石的吸附能力与硅铝比有关，硅铝比越小，吸附能力越高^[35]。MULCHANDANI 等^[36]测定了沸石收集大气水的能力，实验证明，沸石每天产水量约为 0.94 L/m²。TRAPANI 等^[37]发现，A3 型沸石可吸附约 70 mg/g 的水 (25 °C、40% RH)，在 45 °C、10% RH 的条件下几乎不解吸水，但其在 60 °C、RH=10% 的条件下水解吸率高达 96%，说明沸石所需的解吸条件相对较高。而新型 AQSOA 沸石改进了这一问题^[38]，但低压条件下会存在吸附-解吸滞后现象。总体来说，沸石性能稳定，在集水方面应用广泛。

1.3 硅胶类吸湿材料

硅胶的主要成份是 SiO₂，具有较大的比表面积，孔径为 0.7~3.0 nm，比表面积为 100~1000 m²/g。硅胶结构中的亲水基团羟基是吸附中心，可以与极性氧化物 (如水、醇) 形成氢键，一个羟基可吸附一分子水^[35]。因此，硅胶表面的羟基与内部的孔隙为水分的吸附及传输提供了吸附位点和通道，羟基数目越多，孔隙率越大，吸湿能力越强。ESSA 等^[39]使用高吸湿性硅胶在双斜面半圆柱形盆式太阳能蒸馏器中进行集水测试，每天累积产水量约为 400 mL/m²。SLEITI 等^[40]利用厚为 25~35 mm 的硅胶作为吸湿材料，在 12 h 内每千克硅胶的产水量为 159 g。硅胶在大气环境中吸附能力不足，且需要较高的再生温度^[41]，热稳定性有限^[34]，这阻碍了硅胶类吸湿材料发展的脚步。

1.4 MOFs 类吸湿材料

MOFs 材料是近十年来发展迅速的一种配位聚合物，具有孔隙率高、比表面积大、孔道规则、孔径可调以及拓扑结构多样性等优点^[42]，具有很大的用于 SAWH 的潜力。目前，应用于 SAWH 的 MOFs 材料主要有锆基、铝基系列 (如 MOF-801、MOF-808、

MOF-303)、UiO 系列、MIL 系列以及其他系列(如 ZIF 系列)。

MOF-801 是由 12 个相连的 Zr 基簇 $Zr_6O_4(OH)_4(-COO)_{12}$ 组成, 比表面积高达 $950 \text{ m}^2/\text{g}$, 具有较好的稳定性, 可以在 $\text{RH} < 30\%$ 的干旱环境中捕获水分子, 且成本低^[43]。MOF-303 是由 $\text{Al}(\text{OH})(\text{PZDC})$ (PZDC 为 1*H*-吡啶-3,5-二甲酸二甲酯) 组成, 具有垂直孔道, 在 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $32\% \text{ RH}$ 的环境下, 能在几分钟内进行解吸循环, 日产水量为 $1.3 \text{ L}/\text{kg}$ ^[44]。另外, MOF-303 对二价离子截留率高(尤其 Mg^{2+})、稳定性良好, 使产生的冷凝水硬度降低, 满足世界卫生组织对饮水的要求^[45]。MOF-808 是由 $Zr_6O_4(OH)_4(\text{BTC})_2(\text{HCOO})_6$ (BTC 为均苯三甲酸) 组成, LI 等^[46]研究证明, MOF-808 具有大的比表面积以及高的孔隙率, 其作为吸湿材料每天可以产生高达 $8.66 \text{ L}/\text{kg}$ 的水。

UiO-66 是由 $Zr_6O_4(OH)_4(\text{BDC})_6$ (BDC 为苯二甲酸) 组成, 具有水稳定性, 在 $50\% \text{ RH}$ 条件下每分钟吸水率达 $6.56 \text{ g}/\text{kg}$ ^[47]。MIL-101 为规则形状的八面体, 存在大量微孔, 显示出极大的吸附能力。在 $52 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $50\% \text{ RH}$ 的条件下, MIL-101 的吸附容量为 $0.56 \text{ g}/\text{g}$ ^[48]。施加外部压力可以有效增强 MOFs 的框架稳定性^[49], 更好地应用于集水系统。

通过总结 MOFs 类吸湿材料的研究进展, 不难发现, 与其他类吸湿材料相比, MOFs 类吸湿材料在相对较低的湿度条件下仍能够发挥优异的大气集水能力, 并保持长效的水解稳定性和温度稳定性。

1.5 复合材料类吸湿材料

单一类型吸湿材料无法兼顾多方面性能, 只在某方面存在优异性能, 并不能很好地达到 SAWH 高效集水的要求。因此, 需要在单一类型材料的基础上添加其他类型材料或对材料本身进行改性修饰以优化各项性能。水凝胶可以将捕获的水储存在交联聚合物网络中, 矿物质具有较大的孔隙率, MOFs 具有可调节的化学特性和较大的比表面积, 这些独特性质使其具有作为基质的极大潜力, 能够更好地与添加材料进行组合, 增加亲水性官能团的数目、扩大材料的孔隙率与比表面积, 形成吸湿能力更强、性能更优的复合材料。

1.5.1 聚合物类凝胶

吸湿盐潮解可导致盐颗粒聚集并抑制吸收, 研究人员将盐加入到有机凝胶中缓解了这一问题, 盐的吸湿溶解有效增加了凝胶的溶胀性, 同时高孔隙率的凝胶又限制了吸湿盐的泄漏。LI 等^[50]采用了一种交联柔性的水凝胶网络聚丙烯酰胺来保持吸湿盐的固态形式, 其交联网络中含有丰富的亲水性官能

团酰胺基, 制备的聚丙烯酰胺-碳纳米管-氯化钙 (PAM-CNT- CaCl_2) 水凝胶(图 2a) 在 $35\% \text{ RH}$ 条件下的捕水能力是 MOFs 和 CuCl_2 材料的 3 倍。ALEID 等^[51]合成了聚[2-(甲基丙烯酰氧基)乙基]二甲基-(3-磺丙基)氢氧化铵两性离子水凝胶(PDMAPs), 并将 LiCl 与 CNT 嵌入 PDMAP 中制成了复合凝胶 (PDMAPs/CNT/LiCl)。盐析效应使两性离子水凝胶基质具有增强的溶胀能力, 大幅度提高了吸湿性能。

ENTEZARI 等^[52]对海藻酸钠进行修饰, 通过 Li^+ 和 Ca^{2+} 占据 G-嵌段和 M-嵌段中更多的阳离子位置来增加吸附容量, 并通过功能化碳纳米管 (FCNT) 来增加太阳光的光谱吸收, 以提供更多的水分运输通道, 最终制得了低成本的二元聚合盐/FCNT (Bina/FCNT) 复合材料。ZHAO 等^[53]将吸湿性氯掺杂聚吡咯 (PPy-Cl) 和具有可切换亲水性的聚(*N*-异丙基丙烯酰胺) [poly-NIPAM] 集成在一起, 制备了超级吸水凝胶 (SMAG), 在较宽的相对湿度范围内实现了大气集水并高效解吸(图 2b)。活性炭纤维 (ACF) 具有比表面积大、孔径适中、分布均匀及吸附速率快等优点, EJEIAN 等^[7]制备了 $\text{LiCl}/\text{MgSO}_4/\text{ACF}$ 复合材料, 该复合材料提高了在体积和质量方面的吸水能力, 其中, MgSO_4 的加入有助于防止 LiCl 泄漏。WANG 等^[31]将 LiCl 吸湿剂、纳米纤维素亲水骨架和石墨烯集合在一起制备了吸湿气凝胶 (NBHA) 用于 SAWH。纳米纤维素亲水骨架具有的网状缠结结构和活性表面羟基赋予 NBHA 很高的储水能力。NBHA 具有的多孔双层结构使其即使在相对湿度较低 ($\sim 18\% \text{ RH}$) 的条件下也能够很容易地吸收水分。此外, NBHA 中添加的光热转换材料石墨烯不仅不会影响吸湿材料的吸附动力学, 还在吸水率方面有额外的改善。在 $28\% \text{ RH}$ 的湿度环境下, 吸水能力达 $0.76 \text{ g}/\text{g}$, 且机械柔性良好。NI 等^[9]受到冬兰属植物的启发, 开发出一种集成吸湿性光热有机凝胶 (POG) (图 2c), 共聚物骨架内含有吸湿介质甘油, 甘油分子中含有大量羟基, 外加聚吡咯-多巴胺的光热转换作用, 使 POG 具有自容性、协同增强吸湿性, 并实现太阳能驱动界面水分的释放。

1.5.2 MOFs 基复合材料

ZHANG 等^[54]对具有不同官能团 (HCOO^- 、 CH_3COO^- 、 $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$ 和 PhCOO^-) 的 MOFs 中的金属团簇 Zr 进行修饰, 如 BUT-46 MOFs 的 3 个末端 HCOO^- 被 $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$ 取代制得了 BUT-46W [$\text{Zr}_6\text{O}_8(\text{TPHB})_{1.5}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_6$], 并精确把握了该材料在 $24\% \text{ RH}$ 条件下的吸水步骤。XU 等^[30]在 MIL101 中添加吸湿盐 LiCl 合成了 $\text{LiCl}@\text{MIL101}(\text{Cr})$ (图 2d), 很好地利用 MOFs 的多孔性解决了盐的团聚和溶液渗漏问题。该材料综合了盐化学吸附、解离和

溶液吸附等多步吸附过程, 具有相对较低的再生温度和良好的循环稳定性。WU 等^[13]在 UiO-66-NH₂ 中掺杂 MXene Ti₃C₂ (碳化钛碳/氮化物二维纳米层状材料), 制备了具有垂直排列多孔网络的复合材料 (Ti₃C₂ 掺杂 UiO-66-NH₂, TUN), 然后借助交联

的海藻酸钠 (SA) 网络, 进一步加工成 TUN/SA 整体 (图 2e)。TUN/SA 的垂直通道顺应水分子的自然迁移, 有利于增强水蒸气从材料表面向内部或反向的扩散。在太阳光照射下, TUN/SA 可释放 96% 的吸附水。

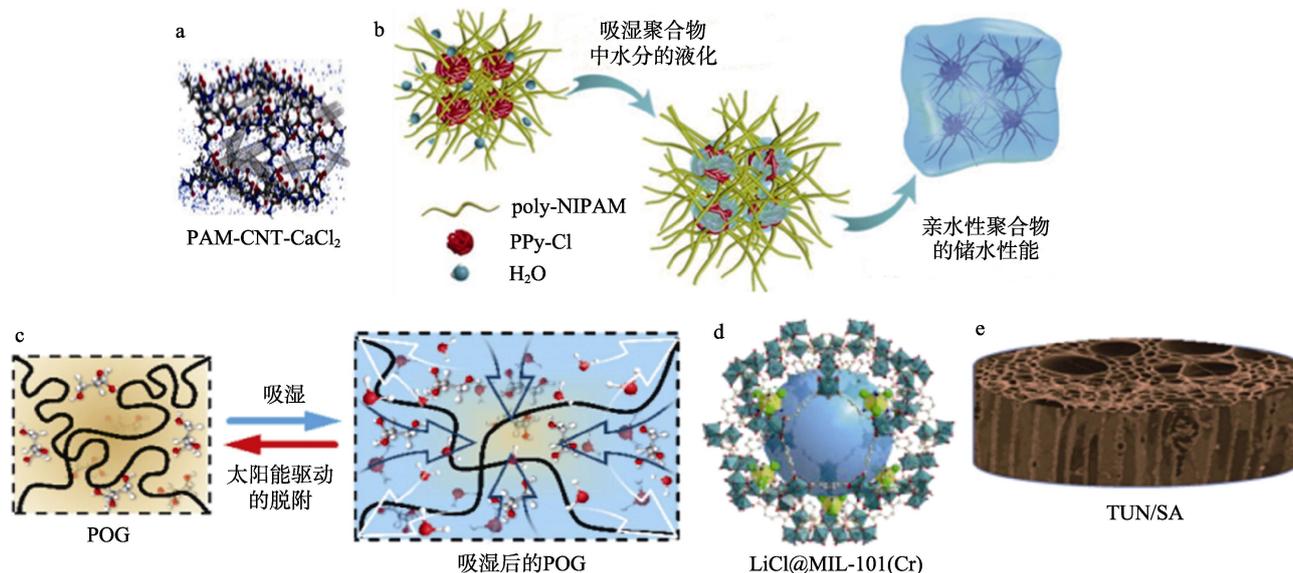


图 2 PAM-CNT-CaCl₂ 水凝胶结构示意图 (a)^[50]; SMAG 的吸湿性示意图 (b)^[53]; 集成 POG 的高吸湿能力示意图 (c)^[9]; LiCl@MIL101(Cr) 的结构示意图 (d)^[30]; TUN/SA 的结构示意图 (e)^[13]
 Fig. 2 PAM-CNT-CaCl₂ hydrogel structure diagram (a)^[50]; SMAG hydrogel hygroscopicity diagram (b)^[53]; High hygroscopicity diagram of integrated POG (c)^[9]; LiCl@MIL101(Cr) structure diagram (d)^[30]; TUN/SA structure diagram (e)^[13]

TANG 等^[55]在 MOFs 中引入间苯二酚-甲醛树脂, 增加了亲水性位点羟基, 提高了材料对水蒸气的吸附能力。将该复合材料用于 SAWH, 可获得 190 g/kg 的水蒸气捕集量。武恩宇等^[56]采用简单的水热法合成了新型铝基金属-有机框架材料 (ZJU-210), 其直径约为 0.58 nm, 且孔道内拥有丰富的氮位点和氧位点, 增强了材料孔道的亲水性。此外, 该材料耐高温, 且具有良好的循环稳定性, 即使在低的湿度 (10%~20% RH) 下仍表现出良好的水蒸气捕获能力。

MOFs 基复合材料的集水能力普遍较高, 是最具规模化应用潜力的大气集水材料。但 MOFs 基复合材料制备工艺普遍较为复杂且成本高, 因此在简化合成步骤方面有待进一步改善。

1.5.3 其他聚合物

MnO₂ 等矿物质在自然界中广泛存在^[57]。利用资源优势, WANG 等^[58]将 KMnO₄ 和 MnSO₄·H₂O 进行氧化还原反应后经一系列反应处理制备了水钠锰矿 (即层状结构 MnO₂)。其中, 夹杂着阳离子 (主要是 K⁺ 的位点) 可在层间以分子方式储存水, 为水吸附提供途径。在较低的相对湿度区域, 水分子迅速吸附到层间; 而在较高的相对湿度区域, 通过表面氢键的相互作用产生多层水-水进而产生凝结水。而且水钠锰矿本身具有良好的太阳能吸收率, 因此

不需要额外的光热转换材料便可直接接触层间水进行解吸。

综上所述, SAWH 的理想吸附剂应具有高吸水能力、快速吸/释水动力学、易再生和长期稳定性。吸水 and 释放动力学是决定吸附剂在一定时间内可执行多少次循环的关键因素, 而以上大多数吸附剂每天只能执行一个捕获-释放循环, 这限制了每天的产水量, 因此在此方面有待进一步突破。此外, 吸湿盐的泄漏问题以及多孔基质传质和传热的权衡问题也应该投入大量研究去解决或改进。对于一些对气体污染物有很高亲和力的吸附材料, 考虑到颗粒污染物可能会沉积在吸附剂表面, 因此应注意产生水的质量问题。目前大多数研究都在追求高吸水能力的吸附剂, 对吸附剂性能的评估并不全面, 提供的数据只能证明该材料在特定应用中的某项优异性能, 很难对比优劣。简而言之, 开发高效且综合性能优异的 SAWH 材料仍然是关键。

2 吸湿材料的性能测试

SAWH 最根本的目的是以节能环保的方式收集大气中的水分, 缓解水资源短缺危机。因此, 要求集水材料需满足的最基本的吸湿效果。此外, 材料

的循环性、热稳定性以及合理的价格也是决定是否能够实现高效集水的关键因素^[59]。本节将对吸湿材料以上性能进行总结, 综合评估性能如表 1 所示。为更直观地分析各类吸湿材料在不同吸湿条件下的吸湿能力现状, 根据表 1 数据的梳理, 进一步绘制了湿度-吸湿能力现状分析图(图 3)。由图 3 可以发现, 复合材料类吸湿材料的总体吸湿率优于其他材料, 即使在湿度较高的条件下, 吸湿盐类的吸湿能力仍较差。沸石类和硅胶类的吸湿性能基本保持稳定, 不会随着湿度的变化出现大幅度的变化。吸湿盐类、沸石类、硅胶类的综合性能远不及复合材料类吸湿材料, 且在 SAHW 应用中相对较少。KPL (*k*-卡拉胶/PPy/LiCl) 水凝胶^[60]无论是在较低湿度 ($\leq 35\% \text{ RH}$), 还是在较高湿度 ($\geq 80\% \text{ RH}$)

下, 均具有最高吸湿能力; 而 ZJU-210^[56]具有最优循环稳定性。这些材料的优异性能使其在淡水生产中具有很大的应用潜力, 如 NBHA^[31]易大规模生产, PAM-CNT-CaCl₂ 水凝胶^[50]的工作范围广, 水钠锰矿^[58]廉价易制备, 适用于解决干旱地区的缺水问题以及输送急需的淡水。其中, Bina/FCNT^[52]在吸附型便携式水生产技术方面具有很大的应用潜力; POG^[9]和 PDMAPS/CNT/LiCl^[51]具备在自然条件下从大气中提取淡水的能力, 可用于淡水生产, 并满足人类饮水的需求。同时, 根据以上吸湿材料的不同性能, 在实际集水应用中应对材料进行慎重选取, 对材料的成本以及适用范围全面考虑, 在确保吸湿系统正常运行的条件下达到最佳的产水效果。

表 1 吸湿材料的分类及性能
Table 1 Classification and properties of moisture absorbing materials

材料分类	材料名称	测试环境	吸湿能力	性能	不足之处	参考文献
吸湿盐类	[EMIM][Ac]	10% RH 20% RH 40% RH 60% RH 80% RH	0.10 g/g 0.18 g/g 0.27 g/g 0.63 g/g 1.18 g/g	循环稳定性(长期循环中水的吸附未衰减); 适用范围广(在较宽的湿度范围内实现高效产水)	解吸条件高	[10]
	CaCl ₂ /棉布	沙特阿拉伯哈伊勒	饱和和质量分数 56.62%	成本低、适用范围广	易抱团; 难再生	[22]
	CaCl ₂ /沙子	印度哈里亚纳	饱和和吸附水 135 g	—	—	[28]
	LiCl/沙子		饱和和吸附水 125 g			
沸石类	沸石(直径 3 mm, 密度 650 kg/m ³)	10%~40% RH	—	适宜在干旱地区使用	—	[36]
	HBEA 型	25 °C、40% RH	~30 mg/g	—	—	[37]
	A3 型	25 °C、40% RH	~70 mg/g	—	温度低时几乎不解吸水 (< 45 °C)	
	AQSOA 型	25~60 °C	0.1~0.3 kg/kg	解吸温度相对较低	低压有吸附-解吸滞后	[38]
硅胶类	1.5 cm 厚硅胶	25 °C、50% RH	25% (吸湿百分数)	价格合理	吸附能力低	[39]
	25~35 mm 厚硅胶	22 °C、30%~60% RH	159 g/kg	成本低	RH < 30% 环境下吸湿效果差	[40]
MOFs 类	MOF-801	15~25 °C、30% RH	0.25 L/kg	水热稳定性(结构中金属离子和有机物不会污染采出的冷凝水)	成本高	[8]
	MIL-101	52 °C、50% RH	0.56 g/g	循环稳定性(10 次循环后吸水、释水能力几乎无差异)	热稳定性能差	[48]
聚合物类凝胶	PAM-CNT-CaCl ₂	35% RH 60% RH 80% RH	0.74 g/g 1.10 g/g 1.75 g/g	物理稳定性(弹性变形量为 560%, 破坏拉伸强度为 35.1 kPa); 循环稳定性(吸水和释放性能在 10 次循环后未显示降解); 适用范围广	不适用于 RH < 10% 的环境	[50]

续表 1

材料分类	材料名称	测试环境	吸湿能力	性能	不足之处	参考文献
聚合物类 凝胶	Bina/FCNT	25 °C、70% RH	5.6 g/g	热稳定性（在 120 °C 下结构不会损坏）；循环稳定性（10 次循环后未观察到样品降解）	锂盐吸水易液化，需对吸附循环时间控制	[52]
	SMAG	90% RH 60% RH 30% RH	6.7 g/g 3.4 g/g 0.7 g/g	适用范围广、在较宽的相对湿度范围内实现高效产水	不能应用于恶劣环境中	[53]
	LiCl/MgSO ₄ /ACF	< 35% RH	0.92 g/g	循环稳定性以及结构稳定性（10 次循环后的吸附量与第一个循环的吸附量相同，多次吸附和解吸后的材料结构没有改变）	不能在高湿度的环境中应用	[7]
	NBHA	~28% RH	0.76 g/g	机械柔性（可多次弯曲、扭曲折叠）；适用范围广	干燥时硬又脆，受力时易折断	[31]
	POG	90% RH	16.01 kg/m ²	抗压耐性以及机械柔性（能够承受 65 kg 人体的大程度卷起、翘曲甚至践踏）	在整个 RH 范围内的吸湿性能有待提高	[9]
	PDMAPS/CNT/LiCl	80% RH	1.75 g/g	循环稳定性（22 次吸水循环后仍保持其高吸水性和解吸能力）	温度 > 110 °C 时水才会完全释放，实际环境下不能完全解吸	[51]
	PAETA-Ac/CNT	沙特阿拉伯图 瓦尔考斯特校 区	0.53 g/g	黏附性；抗压性（潮湿状态下能承受自身质量 1000 倍的负载）；快速吸附动力学（吸附平衡在 3 h 内实现）；循环稳定性（10 次循环后吸水率未明显变化）	制备过程复杂	[61]
	LiCl@rGO-SA	15% RH 30% RH 60% RH	1.01 g/g 1.52 g/g 2.76 g/g	气候适应性广；快速的吸/脱附动力学，在 3 h 内（30% RH）完成水吸附，并在 2 h 内完成水解吸；循环稳定性	在便携式集水的应用方面有待提高	[62]
	KPL	90% RH 20 °C、35% RH	7.6 g/g 1.8 g/g	循环及结构稳定性（10 次循环无结构变形且吸水率无明显衰减）	高温（80 °C）结构易坍塌	[60]
MOFs 基 复合材料	LiCl@MIL101(Cr)	30 °C、30% RH	0.77 g/g	循环稳定性；快速的吸水/脱附动力学，在 3 h 内达到吸附平衡，1 h 内释放水分；脱附温度低（83 °C）	有轻微的吸附-解吸滞后；制备过程需要对盐含量进行控制	[30]
	BUT-46W	$p/p_0=0.87$	785 cm ³ /g	化学稳定性（在酸、碱、沸水中高度稳定）；循环稳定性（5 个循环的水吸附等温线高度相似）	成本高、合成复杂	[54]
	TUN/SA	25 °C、20% RH	0.22 g/g	快速的吸/脱附动力学，在 1.3 和 1 h 内吸水和脱水量基本达到稳定；机械稳定性，便于搬运	导热差、整体热量分布不均匀	[13]
	CAS	25 °C、35% RH	0.36 g/g	100% 的吸附水可以快速释放、高效再生	导热性差	[63]
	ZJU-210	20% RH	0.4 g/g	快速的吸/脱附动力学，在 110 和 8 min（85 °C）内吸水和脱水量达到稳定；循环稳定性（1000 次吸附-脱附循环测试）；热稳定性（可承受 300 °C）	成本高	[56]
其他	水钠锰矿	23% RH	0.07 kg/kg	具有循环稳定性（9 个周期）	吸湿效果较差	[58]

注：[EMIM][Ac]为 1-乙基-3-甲基咪唑醋酸盐；PAETA-Ac/CNT 为聚阳离子/醋酸盐/碳纳米管复合水凝胶；LiCl@rGO-SA 为还原氧化石墨烯/海藻酸钠/氯化锂复合水凝胶；CAS 为商用碳纤维/Al 富马酸盐/海藻酸钠复合凝胶（CF/Al-fumarate/SA）；“—”表示未给出数据。

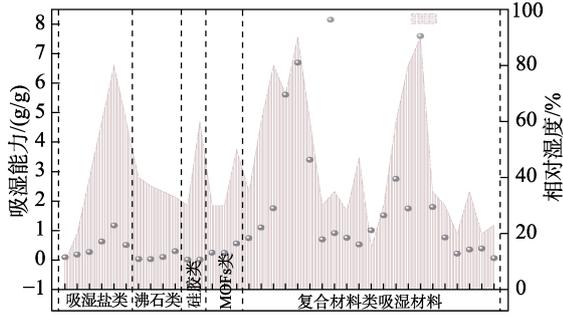


图 3 湿度-吸湿能力现状分析图^[7-8,10,13,22,30,31,37-38,40,48,50-53,56,58,60-63]
 Fig. 3 Humidity-moisture absorption capacity diagram^[7-8,10,13,22,30,31,37-38,40,48,50-53,56,58,60-63]

3 SAWH 系统的设计及实际应用

大气集水系统中水的解吸(脱附)过程的方法主要有电加热^[63-65]和太阳能加热^[9,53]。本着节能降耗的设计理念,电加热解吸逐渐被太阳能加热替代。

经过近年来的快速发展,研究者在不断地优化基于吸附的 SAWH,追求更高效、更环保、连续运行的大气集水装置。针对一些共性问题进行了研究。具体包括:如何提高装置的吸附饱和上限和解吸速率,如何优化装置的光热转换效率,如何改善装置的冷凝效果来实现快速集水等。但无论从哪一个角度进行优化,集水装置的总体集水路线大致保持相同,即选用高效的吸附材料从空气中吸收水分,然后利用太阳能借助光热转换材料来提高吸湿材料的温度,从而激发解吸,释放的水蒸气凝结后收集,以实现循环运行。

KIM 等^[8]运用被动辐射冷却技术设计了一套基于 MOF-801 的集水装置(图 4a),平衡吸收量约为 0.25 kg/kg (15~25 °C、30% RH),即便在干燥沙漠条件下(10%~40% RH)也能开展应用,预计该装置每天能够产生 0.25 L/kg 的水,集水产量虽增加但每天只能进行一个吸附-脱附循环。

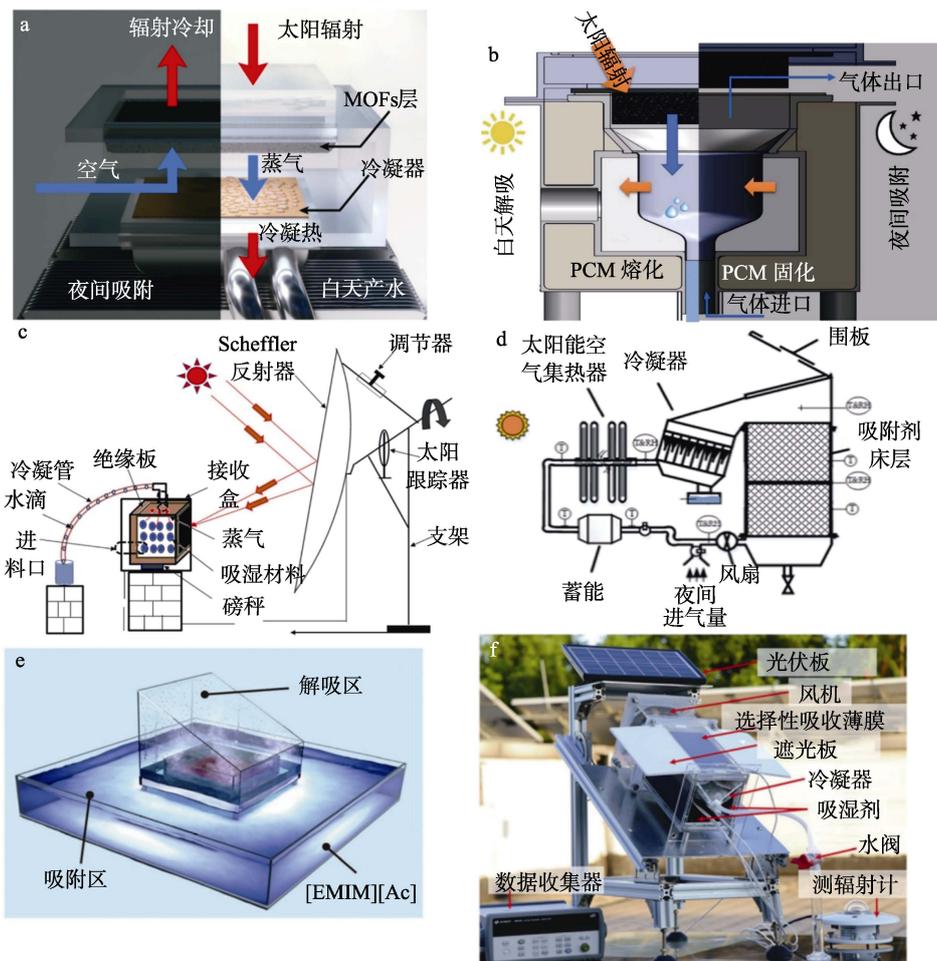


图 4 SAWH 装置的优化设计示意图: 基于被动辐射冷却技术的集水装置 (a)^[8]; 基于相变材料 (PCM) 提高冷凝器效果的集水装置 (b)^[7]; 固定焦点式集水装置 (c)^[11]; 基于蜂窝状吸附床的集水装置 (d)^[12]; 基于界面加热技术的集水装置 (e)^[10]; 基于矩形阵列吸附床的集水装置 (f)^[62]

Fig. 4 Optimal design of SAWH collection device: Water collection device based on passive radiation cooling technology (a)^[8]; Water collection device based on phase change material (PCM) to improve the effect of condenser (b)^[7]; Fixed focus water collection device (c)^[11]; Water collection device based on honeycomb adsorption bed (d)^[12]; Water collection device based on interface heating technology (e)^[10]; Water collection device based on rectangular array adsorption bed (f)^[62]

FATHIEH 等^[66]同样使用 MOF-801 作为吸湿材料, 为了提高系统中水蒸气的冷凝效果, 该系统在冷凝器的外壳侧壁表面涂覆红外反射涂层, 并在盖子上安装反射器, 确保只有 MOFs 的表面暴露在太阳辐射下, 以此保持较低的冷凝器温度。而 EJEIAN 等^[7]则使用相变材料来提高冷凝器效果(图 4b), 利用相变材料储存夜间的自然寒冷来保持冷凝器温度恒定。将该装置在 35% RH 的夏天进行测试, 一天内成功收获了 0.92 L/kg 的水, 所以该装置的设计原理在降低热损失方面具有较高的参考价值。

SRIVASTAVA 等^[11]设计了 Scheffler 反射器(图 4c), 将太阳能集中在一个固定点上, 提高了太阳能的利用率, 从而更高效地解吸水蒸气。WANG 等^[12]从蜂巢的六边形格子中得到灵感, 设计了基于蜂窝状吸附床的集水装置(图 4d)。将大量的吸附剂加工成板状或波纹状结构, 使比表面积最大化。该装置即使在沙漠中极端干燥的气候条件(15 °C、37% RH)下, 每天可产淡水 14.3 kg, 为缓解沙漠和岛屿地区的淡水短缺提供了一种非常实用的解决方案。QI 等^[10]将界面太阳能加热技术与离子液体基吸收剂相结合设计了集水器(图 4e), 以亲水性碳纤维膜为太阳能吸收剂, 高吸湿性离子液体 [EMIM][Ac]作为吸收剂, 实现了吸附剂表面的局部热化, 解决了不完全的日间解吸问题, 该系统每天的产水量为 2.8 L/m²。

HAECHLER 等^[67]将辐射屏蔽和冷却协同结合起来, 使用超疏水冷凝器以及对水滴进行聚结诱导除水机制对采水系统进行了优化, 使凝结的水滴在最大程度上得到收集。该系统因无需额外的能量输入, 为进一步实现任意辐射冷却材料性能最大化开辟了新的途径。WU 等^[13]利用 TUN/SA 作为大气水吸附剂, 配备了可翻转的吸附级, 能够在太阳光照射下连续生产水。该系统在 1 kW/m² 的辐射下, 该器件在 20% RH、298 K 条件下表现出 58 mL/(kg·h) 的产水能力。为了达到更好的吸附效果, XU 等^[62]集成 4 层吸附剂板设计了具有矩形阵列吸附床的 SAWH 装置(图 4f), 增大了吸附床层面积。该装置通过交替切换 4 个吸附剂片的位置, 兼具协同传热和传质增强功能, 每天可实现 8 个连续的吸附-解吸循环, 产生高达 2120 mL/kg 的水。

目前, 对 SAWH 的研究主要集中在各种高性能吸附材料的开发上, 而对整个系统的优化研究较少。事实上, 系统级设计同样重要, SAWH 技术的进一步发展必须高度依赖于材料和系统工程的共同发展。除了上述讨论的吸附床及冷凝器的设计策略外, 还可以通过优化能源利用效率来进一步提高系统性能, 如将能源转换为热能、电能、风能加以

利用。但 SAWH 系统中能源的充分利用在很大程度上尚未探索, 因此添加热电模块、将热能采集器或转换器与该系统相结合是很有前途的方法。SAWH 有效利用环境能源来提高系统性能方面也值得探索。例如: 可以采用特殊设计, 利用自然风来增强 SAWH 系统中的分子扩散和传热。此外, 如何在不同天气状况下以节能的方式在单位时间产生足够的淡水, 以及在偏远地区使用系统、系统外体使用材料、最大限度地减少热损失以及系统高效运行、低维护费用是关键问题, 这都是未来需要应对的挑战。

值得关注的是, SAWH 技术已用于实际生产, 如 FATHIEH 等^[66]论证出大气集水装置在沙漠气候下的水分为 78 g/d, 水生产量更接近实际应用。HANIKEL 等^[44]使用集水装置在莫哈韦沙漠(27 °C、32% RH)实现每天 8~9 次吸附-解吸循环, 并达到每天 1.3 L/kg 的产水率。WANG 等^[68]使用活性炭纤维/硅胶/LiCl (ASLi) 复合材料在 31 °C、70% RH 的真实岛屿气候条件下, 一天内可实现 2 次吸附-脱附循环, 日产水量可达 0.39 kg/kg。以上结果均说明, SAWH 系统有望在沙漠、海岛地区实现大规模、实用的供水。此外, SAWH 技术已在农业应用方面取得了实质性进展, 如在稳定的相对湿度条件下, 从空气中取得的水可提供充足的水源, 萝卜种子仅需 2 d 就能发芽^[69], 还用于菠菜的种植^[70]以及屋顶农业水生植物的土壤灌溉^[71]。因此, SAWH 技术对全球水-能源-粮食的关系做出了重大的贡献, 为分散供水和适合干旱和半干旱地区及其他地区的作物生产提供了有希望的解决方案, 具有实现可持续发展目标的潜力。

4 结束语与展望

SAWH 是解决资源短缺问题的一种可行、可持续的方法。该技术具有分散供水的优势, 不受地域限制, 尤其对于中国干旱缺水及水运网络不发达地区尤为重要, 潜在地支持了数百万人的饮用需求以及农业用水, 有效缓解了中国的淡水危机。本文全面综述了 SAWH 的最新进展, 整理了目前应用于 SAWH 的吸湿盐类、沸石类、硅胶类、MOFs 类等吸湿材料, 并对材料的性能进行了综合比较。优良的吸水性是实现高效大气集水的先决条件, 但结构稳定、循环稳定等性能在 SAWH 实际应用中也起着关键作用。其中, 吸湿盐类、沸石类、硅胶类、MOFs 类等单一类型吸湿材料虽在价格或某一方面具有优势, 但仍存在许多问题, 如易抱团、难再生、难解吸、难合成等。而聚合物类凝胶等复合材料类吸湿材料表现出较好的综合性能, 同时也是大气集水实

际应用中常用的材料。复合材料类吸湿材料是利用材料本身的独特三维网络结构或化学键的交联作用削弱单一吸湿材料对整体材料的劣势影响, 同时综合或放大其他材料的优异性能, 使之在各方面均能满足 SAWH 的要求。此外, 分析了不同 SAWH 系统, 通过在吸附脱附上限、冷凝效果、光热转换效率等方面对集水装置进行设计和改进。

尽管 SAWH 已经取得了巨大进展, 但仍有一些问题和挑战需要从基本认识和实际应用的角度加以解决, 基于对 SAWH 技术的全面梳理, 建议未来的研究方向应深入探讨以下 4 个方面问题:

(1) 吸湿材料的高吸水能力归因于大的比表面积和孔体积, 但固体材料(沸石等)因孔体积的限制阻碍了吸收率的提高, 因此, 协调吸湿材料的孔性能、溶胀能力、亲水基团的数量等参数是突破吸湿性能的关键。另外, 从应用的角度来看, 吸附水的脱附非常重要, 若所报道材料的再生温度 >110 °C, 靠太阳能对吸附水进行充分解吸仍具有一定的难度;

(2) 依靠太阳能的集水系统普遍以夜间吸附、白天解吸的循环模式进行, 但目前对吸湿材料的水热稳定性研究不足, 吸湿材料的吸附能力有时会随时间的变化呈指数形式衰减, 导致吸湿材料固有的吸附时间尺度与每日周期不一致, 因此, 调节产水周期, 如一天内使用多个集水周期, 将加快 SAWH 技术的应用步伐;

(3) 目前的大气集水装置在解吸水的过程中, 通常需要将吸湿材料放置在冷凝罩下, 以蒸气的形式附着在冷凝罩的内壁上形成水滴, 但水滴和蒸气的产生会阻碍阳光在吸湿材料表面的照射, 降低太阳能的利用率, 如何解决这一瓶颈对 SAWH 的推广应用具有重要意义;

(4) 由于缺乏 SAWH 的长期稳定性和大规模实施研究, 且目前的研究中, 每天的水生产力仍然不能满足广泛的用水需求。因此, 将可扩展的 SAWH 部署到实际商业和工业层面仍具有需克服的问题和巨大的障碍。

参考文献:

- [1] SALEHI M. Global water shortage and potable water safety: Today's concern and tomorrow's crisis[J]. *Environment International*, 2022, 158: 106936.
- [2] HE C Y, LIU Z F, WU J G, *et al.* Future global urban water scarcity and potential solutions[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-11.
- [3] MALIK F T, CLEMENT R M, GETHIN D T, *et al.* Nature's moisture harvesters: A comparative review[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(3): 031002.
- [4] LI J Y (李吉焱), LIU M C (刘美辰), JING Y J (景艳菊), *et al.* Solar interface evaporation synergistic power generation: Progress and prospect[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2022, 39(10): 1945-1952, 1963.
- [5] LI J Y (李吉焱), JING Y J (景艳菊), XING G Y (邢郭宇), *et al.* Research progress of salt-resistant solar interface photothermal materials and evaporators[J/OL]. *Chemical Industry and Engineering Progress (化工进展)*, 2022. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1732
- [6] LI J Y, JING Y J, XING G Y, *et al.* Solar-driven interfacial evaporation for water treatment: Advanced research progress and challenges[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(36): 18470-18489.
- [7] EJEIAN M, ENTEZARI A, WANG R Z. Solar powered atmospheric water harvesting with enhanced LiCl/MgSO₄/ACF composite[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 176: 115396.
- [8] KIM H, RAO S R, KAPUSTIN E A, *et al.* Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1191.
- [9] NI F, QIU N X, XIAO P, *et al.* Tillandsia-inspired hygroscopic photothermal organogels for efficient atmospheric water harvesting[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(43): 19237-19246.
- [10] QI H S, WEI T Q, ZHAO W, *et al.* An interfacial solar-driven atmospheric water generator based on a liquid sorbent with simultaneous adsorption-desorption[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(43): 1903378.
- [11] SRIVASTAVA S, YADAV A. Extraction of water particles from atmospheric air through a scheffler reflector using different solid desiccants[J]. *International Journal of Ambient Energy*, 2018, 41(12): 1357-1369.
- [12] WANG J Y, WANG R Z, TU Y D, *et al.* Universal scalable sorption-based atmosphere water harvesting[J]. *Energy*, 2018, 165: 387-395.
- [13] WU Q N, SU W, LI Q Q, *et al.* Enabling continuous and improved solar-driven atmospheric water harvesting with Ti₃C₂-incorporated metal-organic framework monoliths[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(32): 38906-38915.
- [14] CHUA H T, NG K C, MALEK A, *et al.* Modeling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chillers[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(3): 194-204.
- [15] SAHA B B, KOYAMA S, LEE J B, *et al.* Performance evaluation of a low-temperature waste heat driven multi-bed adsorption chiller[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29(8): 1249-1263.
- [16] SHIVANNA M, BEZRUKOV A A, GASCON-PEREZ V, *et al.* Flexible coordination network exhibiting water vapor-induced reversible switching between closed and open phases[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(34): 39560-39566.
- [17] SRIVASTAVA N C, EAMES I W. A review of adsorbents and adsorbates in solid-vapour adsorption heat pump systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 1998, 18(9/10): 707-714.
- [18] KATO Y, YAMADA M, KANIE T, *et al.* Calcium oxide/carbon dioxide reactivity in a packed bed reactor of a chemical heat pump for high-temperature gas reactors[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2001, 210(1/2/3): 1-8.
- [19] DENG F F, XIANG C J, WANG C X, *et al.* Sorption-tree with scalable hygroscopic adsorbent-leaves for water harvesting[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(12): 6576-6586.
- [20] SÖGÜTOĞLU L C, STEIGER M, HOUBEN J, *et al.* Understanding the hydration process of salts: The impact of a nucleation barrier[J]. *Crystal Growth & Design*, 2019, 19(4): 2279-2288.
- [21] VAINIO E, DEMARTINI N, HUPA L, *et al.* Hygroscopic properties of calcium chloride and its role on cold-end corrosion in biomass combustion[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(11): 11913-11922.
- [22] ELASHMAWY M, ALSHAMMARI F. Atmospheric water harvesting from low humid regions using tubular solar still powered by a parabolic concentrator system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120329.
- [23] GIBSON E R, HUDSON P K, GRASSIAN V H. Aerosol chemistry and climate: Laboratory studies of the carbonate component of mineral dust and its reaction products[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(13): L13811.

- [24] JING B, WANG Z, TAN F, *et al.* Hygroscopic behavior of atmospheric aerosols containing nitrate salts and water-soluble organic acids[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(7): 5115-5127.
- [25] GUO L Y, GU W J, PENG C, *et al.* A comprehensive study of hygroscopic properties of calcium- and magnesium-containing salts: Implication for hygroscopicity of mineral dust and sea salt aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(4): 2115-2133.
- [26] ZHAO H Z, LEI M, LIU T, *et al.* Synthesis of composite material HKUST-1/LiCl with high water uptake for water extraction from atmospheric air[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2020, 511: 119842.
- [27] YI X Q (易晓勤), LIU X H (刘晓华). Comparison of dehumidification performance of two liquid absorbents[J]. *Chinese Science Paper Online (中国科技论文在线)*, 2009, 4(7): 522-526.
- [28] SRIVASTAVA S, YADAV A. Water generation from atmospheric air by using composite desiccant material through fixed focus concentrating solar thermal power[J]. *Solar Energy*, 2018, 169: 302-315.
- [29] MASTRONARDO E, PIPEROPOULOS E, PALAMARA D, *et al.* Morphological observation of LiCl deliquescence in PDMS-based composite foams[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1510.
- [30] 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.
- [31] WANG M Z, SUN T M, WAN D H, *et al.* Solar-powered nanostructured biopolymer hygroscopic aerogels for atmospheric water harvesting[J]. *Nano Energy*, 2021, 80: 105569.
- [32] ZHANG H H, GU W J, LI Y J, *et al.* Hygroscopic properties of sodium and potassium salts as related to saline mineral dusts and sea salt aerosols[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 95: 65-72.
- [33] LI R Y, SHI Y, SHI L, *et al.* Harvesting water from air: Using anhydrous salt with sunlight[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(9): 5398-5406.
- [34] YUAN Y P, ZHANG H Q, YANG F, *et al.* Inorganic composite sorbents for water vapor sorption: A research progress[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 761-776.
- [35] WANG L W, WANG R Z, OLIVEIRA R G. A review on adsorption working pairs for refrigeration[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(3): 518-534.
- [36] MULCHANDANI A, WESTERHOFF P. Geospatial climatic factors influence water production of solar desiccant driven atmospheric water capture devices[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(13): 8310-8322.
- [37] TRAPANI F, POLYZOIDIS A, LOEBBECKE S, *et al.* On the general water harvesting capability of metal-organic frameworks under well-defined climatic conditions[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2016, 230: 20-24.
- [38] TEO H W B, CHAKRABORTY A, FAN W. Improved adsorption characteristics data for AQSOA types zeolites and water systems under static and dynamic conditions[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2017, 242: 109-117.
- [39] ESSA F A, ELSHEIKH A H, SATHYAMURTHY R, *et al.* Extracting water content from the ambient air in a double-slope half-cylindrical basin solar still using silica gel under egyptian conditions[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 39: 100712.
- [40] SLEITI A K, AL-KHAWAJA H, AL-KHAWAJA H, *et al.* Harvesting water from air using adsorption material-Prototype and experimental results[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 257: 117921.
- [41] GORDEEVA L G, GREKOVA A D, KRIEGER T A, *et al.* Adsorption properties of composite materials (LiCl+LiBr)/silica[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2009, 126(3): 262-267.
- [42] RYU U, JEE S, RAO P C, *et al.* Recent advances in process engineering and upcoming applications of metal-organic frameworks[J]. *Coord Chem Rev*, 2021, 426: 213544.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] CONG S Z, YUAN Y, WANG J X, *et al.* Highly water-permeable metal-organic framework MOF-303 membranes for desalination[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, 143(48): 20055-20058.
- [46] LI Z Q, YANG J C, SUI K W, *et al.* Facile synthesis of metal-organic framework MOF-808 for arsenic removal[J]. *Materials Letters*, 2015, 160: 412-414.
- [47] LOGAN M W, LANGEVIN S, XIA Z Y. Reversible atmospheric water harvesting using metal-organic frameworks[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-11.
- [48] ZHAO H Z, LI Q W, WANG Z Y, *et al.* Synthesis of MIL-101(Cr) and its water adsorption performance[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, 297: 110044.
- [49] CELESTE A, PAOLONE A, ITIÉ J P, *et al.* Mesoporous metal-organic framework MIL-101 at high pressure[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, 142(35): 15012-15019.
- [50] LI R Y, SHI Y, ALSAEDI M, *et al.* Hybrid hydrogel with high water vapor harvesting capacity for deployable solar-driven atmospheric water generator[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(19): 11367-11377.
- [51] ALEID S, WU M C, LI R Y, *et al.* Salting-in effect of zwitterionic polymer hydrogel facilitates atmospheric water harvesting[J]. *ACS Materials Letters*, 2022, 4(3): 511-520.
- [52] 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.
- [53] ZHAO F, ZHOU X Y, LIU Y, *et al.* Super moisture-absorbent gels for all-weather atmospheric water harvesting[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(10): 1806446.
- [54] ZHANG Y Z, HE T, KONG X J, *et al.* Tuning water sorption in highly stable Zr(IV)-metal-organic frameworks through local functionalization of metal clusters[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(33): 27868-27874.
- [55] TANG S Y, WANG Y S, YUAN Y F, *et al.* Hydrophilic carbon monoliths derived from metal-organic frameworks@resorcinol-formaldehyde resin for atmospheric water harvesting[J]. *New Carbon Materials*, 2022, 37(1): 237-244.
- [56] WU E Y (武恩宇), QIAN G D (钱国栋), LI B (李斌). Water adsorption properties of aluminum-based metal-organic frameworks and application in atmospheric water collection[J]. *Journal of Zhejiang University (浙江大学学报)*, 2022, 56(1): 186-192.
- [57] TIAN Z R, TONG W, WANG J Y, *et al.* Manganese oxide mesoporous structures: Mixed-valent semiconducting catalysts[J]. *Science*, 1997, 276(5314): 926-930.
- [58] WANG J L, DANG Y L, MEGUERDICHIAN A G, *et al.* Water harvesting from the atmosphere in arid areas with manganese dioxide[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2019, 7(1): 48-53.
- [59] ZHOU X Y, LU H Y, ZHAO F, *et al.* Atmospheric water harvesting: A review of material and structural designs[J]. *ACS Materials Letters*, 2020, 2(7): 671-684.
- [60] HE J T, LI N, WANG S X, *et al.* Hygroscopic photothermal beads from marine polysaccharides: Demonstration of efficient atmospheric water production, indoor humidity control and photovoltaic panel cooling[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(15): 8556-8567.
- [61] WU M C, LI R Y, SHI Y, *et al.* Metal- and halide-free, solid-state polymeric water vapor sorbents for efficient water-sorption-driven cooling and atmospheric water harvesting[J]. *Materials Horizons*, 2021, 8(5): 1518-1527.