

新型水处理技术的研究现状

严寒, 丁丽萍, 王艳青*

南通大学化学化工学院, 江苏 南通

收稿日期: 2023年7月17日; 录用日期: 2023年10月31日; 发布日期: 2023年11月6日

摘要

水是地球上最宝贵的资源之一, 但由于人类活动和环境污染的不断加剧, 水资源短缺和水污染问题日益突出。为了解决这一问题, 研究者们一直致力于开发新型水处理技术, 这些技术兼具能耗更小、污染更少、净化率更高的特点。由于传统水处理方法的局限性和不足之处, 已不能满足人们的需求。本文介绍了一系列新型水处理技术的发展和现状, 其中包括基于膜分离技术的纳滤、超滤和反渗透, 基于热能的多效蒸馏、多级闪蒸, 以及不同种类材料在基于太阳能的水处理技术中的应用, 并对其未来的发展趋势进行了展望。

关键词

新型水处理技术, 膜分离技术, 热能技术, 太阳能技术

Research Status of New Water Treatment Technologies

Han Yan, Liping Ding, Yanqing Wang*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu

Received: Jul. 17th, 2023; accepted: Oct. 31st, 2023; published: Nov. 6th, 2023

Abstract

Water is one of the most precious resources on earth, but due to the continuous intensification of human activities and environmental pollution, the problems of water scarcity and pollution are becoming increasingly prominent. In order to solve these problems, researchers have been committed to developing new water treatment technologies that combine the characteristics of lower energy consumption, less pollution, and higher purification rates. Due to the limitations and

*通讯作者。

shortcomings of traditional water treatment methods, they can no longer meet people's needs. This article introduces the development and application status of a series of new water treatment technologies, including nanofiltration, ultrafiltration, and reverse osmosis based on membrane separation technology, multi effect distillation based on thermal energy, multi-stage flash distillation, and the application of different types of materials in solar powered water treatment technology. And prospects for future development trends were presented.

Keywords

New Water Treatment Technology, Membrane Separation Technology, Thermal Energy Technology, Solar Energy Technology

Copyright © 2023 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

水资源是人类生存和发展的重要基础资源,对于国家的经济发展和社会稳定至关重要。地球上约 70% 的面积被海洋覆盖,而淡水资源仅占有所有水资源的 2.5% 左右,其中又有约 68.7% 被冰川、雪山等地方存储,只有约 30% 的淡水可供人类直接使用。水资源分布的极度不平衡,随着人口的增长、经济的发展、气候变化和环境污染等因素的影响,全球水资源短缺问题逐渐凸显[1],全球已有 40% 的人口生活在水资源紧缺的地区。

除了水资源自身的分布不均,目前还存在一定的问题导致淡水资源的进一步紧缺。主要包括几个方面:全球人口的不断增长和工业化、城市化进程的加速,导致淡水资源日益减少,并且水资源的不合理利用、浪费和污染也使得淡水资源更加紧缺。其次,随着工业和城市化的快速发展,水污染问题日益突出,水质严重下降,例如,我国部分地区面临着严重的水质污染问题,尤其是重工业和煤炭产业集中的地区,水污染问题已经影响到当地居民的生活和健康[2]。这些问题使得水资源的利用效率低下,并且导致了水资源的过度开发和污染等问题[3]。因此,寻找新型水处理技术成为当今研究的热点和挑战。近年来,许多新型水处理技术得到了广泛关注和研究。本文旨在总结这些新技术的进展和应用,为进一步的研究提供参考。

2. 新型水处理技术

淡水资源已经十分紧缺,故将已受污染的水或海水净化成淡水的水处理技术备受关注。传统水处理技术主要有三大类:1) 物理法:通过清除湖泊、河流底部的垃圾、淤泥和藻类植物实现,没有真正使污染物降解,并且成本较高[4]。2) 化学法:需要投入絮凝剂等化学物质,容易造成二次污染。3) 生物法:通过在水中加入一些特定菌种或水生植物,但同时又存在破坏生态系统稳定性的风险[5]。传统处理技术上存在着种种不足,因此,能耗更小、污染更少、净化率更高的新型水处理技术研究至关重要。

2.1. 基于膜的处理技术

膜分离技术具有不易造成二次污染、占用体积小、自动化程度高等优点,被誉为“二十一世纪的水处理技术”。这种处理技术基于选择透过性膜这一分离介质,在膜两侧压力差的作用下使溶液与溶剂分离。目前依据膜的孔径和截留特性的不同,分为超滤膜(UF)、纳滤膜(NF)、反渗透膜(RO)。

(1) 超滤膜

超滤技术以分离为基础, 结合液体压力差等方面的作用, 促使水中各种物质由超滤膜的一侧运动至另一侧, 将分子量较高的物质进行筛除与剥离, 从而实现水质净化[6], 如图 1 所示。超滤膜的膜孔大小约为 $0.001\sim 0.02\ \mu\text{m}$, 截留分子量通常为 $1000\sim 300,000$ [7], 因此能对一些大分子物质起到很好的去除作用。相比于传统膜, 超滤膜技术的过滤效果更显著, 且精度更高, 并拥有优异的稳定性, 可以耐受较高的环境温度。此外, 超滤膜分离技术属于物理性截留过滤, 不依赖其他絮凝剂、吸附剂等, 具有绿色环保的优势, 能对水体中的微生物、胶体颗粒、悬浮杂质等起到去除作用。超滤系统的结构具有简单便捷、模块化程度高、投资成本较少等特点, 随着膜工业的发展和进一步研究, 膜性能不断提高, 超滤技术也不断和其他水处理技术相结合达到更好的去污产水效果。但超滤技术最显著的缺陷就是膜污染, 这会导致滤出的水质下降, 并减短超滤膜的使用寿命[8]。鉴于此, Song 等人[9]提出将亚铁活化的亚硫酸钙氧化与超滤膜相结合的方法去除水体中铜绿微囊藻、小球藻和四头栅藻, 在去除水体中藻类方面显示出良好的应用潜力, 并且反应产生的活性氧和 Fe-Ca 复合絮体有效缓解了膜污染问题。Liu 等人[10]基于膜在操作和清洁过程中的损坏, 将 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸和聚苯胺(AMPS-PANI)掺入膜基质中, 开发了一种新型的自修复超滤膜, 不仅赋予膜物理和化学自修复性能, 而且使其能够有效对水中的无机盐和染料进行分离。Wu [11]等人通过将氧化石墨烯(GO)与具有强防污性能的两性离子材料椰油酰胺丙基甜菜碱(CAB)接枝, 制备了 CAB-GO 复合纳米片。采用聚醚砜(PES)相转化法制备了 CAB-GO/PES 混合基质超滤膜(CGM)。由于其静电相互作用, 增加了 CAB-GO 纳米片之间的层间距离, 并提高了 GO 的分散性, 从而有效避免了 GO 在有机溶剂中的团聚现象。基于 CAB-GO/PES 混合基质膜表面孔隙率和表面亲水性的改善, CGM-1.0 的纯水通量可达 $461\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 是原始 PES 膜的 2.5 倍, 对 BSA 和 HA 的截留率均在 96% 以上, 表现出优异的防污能力。

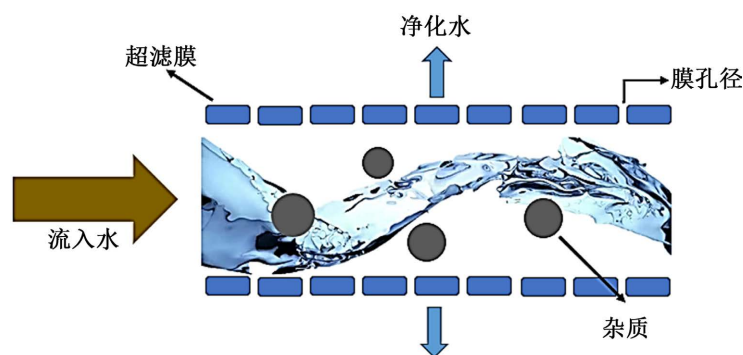


Figure 1. Schematic diagram of ultrafiltration membrane water purification
图 1. 超滤膜净水原理图

(2) 纳滤膜

孔径范围在 $1\sim 3\ \text{nm}$, 截留相对分子质量范围为 $200\sim 1000$ 的称为纳滤膜。纳滤膜对于较低分子质量的有机物和高价态的无机盐(如 CaCl_2 等)截留效果很好, 但对一价的无机盐的截留率较低。在膜通量不变的情况下, 纳滤膜所要求的驱动压力比反渗透膜的要低得多, 如表 1 所示, 通常纳滤的操作压力为 $0.5\sim 1.5\ \text{MPa}$, 这些是由于它的结构特征所带来的电荷效应和筛分效应。因此, 纳滤膜具有截留分子量低、操作压力低、选择性高、机械强度较高、化学稳定性和热稳定性较高、易再生、易清洗、寿命长等特点[12]。

根据分离特性, 纳滤膜在水处理方面主要包括地下水、地表水以及海水淡化的前处理工艺等。它可以有效去除水体中的臭味、微生物以及部分有机物, 并且可以去除大部分高价离子而保留单价离子,

因此可以满足人体所需的一些微量元素,进一步提升饮用水的健康性[13]。正因为纳滤膜的诸多优势,近年来在饮用水净化、海水淡化等方面得到了较为广泛的应用[14]。赵长伟等[15]列举了纳滤去除各类污染物的研究,例如水中药品(布洛芬、诺氟沙星等)、全氟化合物、内分泌干扰物、微囊藻毒素以及新兴污染物,提出了纳滤膜在净水技术中迎来的机遇和如何进一步提高纳滤膜的去除性能等问题。Wang 等人[16]制备了一种带夹层的复合纳滤膜,在聚丙烯腈(PAN)超滤膜表面沉积聚咖啡酸(PCA)以构建中间层,然后在 PCA 中间层上形成聚酰胺(PA)层以制备复合膜(PAN-PCAn-PA),膜表面构建的松散沟槽状夹层和纳米级图灵结构,优化了水分子的传输通道,使其具有优异的透水性($17.7 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$)和对 Na_2SO_4 高达 98.9%的截留率,并且具有长期的过滤稳定性,显示出其在海水淡化中的实际应用潜力。但仍面临着膜基质在有机溶剂中溶胀和溶解的挑战,为了解决这些问题,Zhang [17]等人采用对有机溶剂具有强耐受性的聚四氟乙烯(PTFE)基底来制备耐溶剂纳滤复合膜。提出了一种新型的反柔性链结合界面聚合(rFB-IP)方法,在 PTFE 基体上制备具有超低表面能的聚酰胺(PA)选择层。采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为柔性链粘合剂增强基材和选择层之间的结合力,在基材表面和孔隙内产生交联网络,从而与 PA 选择层形成互穿结构。所制备的 rPA-PDMS/mPTFE 复合膜的 DMF 渗透率为 $0.4 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$,对染料的截留率为 97.1%,在过滤过程中 120 h 或在 DMF 中浸泡 120 天后性能稳定。因此, rFB-IP 技术成功解决了 PTFE 基片在复合膜制造中的应用问题,在极性非质子耐溶剂纳滤膜的开发中具有突出的潜力。

Table 1. Comparison table of characteristics of different filter membranes [18]

表 1. 不同过滤膜特征对比表[18]

种类	孔径(nm)	过滤原理	适用物质
超滤	10~100	在压力(0.1~1.0 Mpa)作用下通过膜表面的微孔筛选	胶体、颗粒和相对分子量较高的物质
纳滤	1~10	以压力差(0.5~1.5 Mpa)作为推动力,溶解-扩散原理和静电作用对离子进行截留	无机盐和有机小分子
反渗透	<1	以比自然渗透更大的压力(1~10 MPa)使渗透向相反方向进行,从而将水分子压力到膜的另一边	海水淡化

(3) 反渗透膜

反渗透作用是指在溶质浓度较高的一侧施加压力,使反渗透膜两侧形成压力差,当这个压力超过某一数值时将迫使高浓度区的溶剂流入低浓度区,从而实现分离,如图 2。在海水淡化应用中,即为反渗透膜一侧输入海水,在海水侧施加高于两侧溶液渗透压差的压力,使海水中的水在反渗透作用下通过反渗透膜,从而将海水中的水分离出来,得到所需要的淡水。

反渗透膜的孔径大约为 0.1~1 nm,工作压力约需达到 1.5~10.5 MPa,分离过程中除了物理截留还具有离子选择性,能够有效去除二价离子、一价离子以及大于 200 分子量的有机污染物。反渗透产水的水质高,但是过程需要较大的跨膜压力与能量,操作成本较高,并且如果没有采取科学合理的预处理措施,极易造成反渗透膜的污染,从而降低净水性能[19]。Ho Duc Tam 等人[20]通过分子动力学模拟发现,蜂窝和三角形石墨烯膜可以通过将高孔密度与施加应变调节孔径相结合来克服高成本问题,制备的石墨烯膜能够将盐截留和水渗透性完美结合,在 66 至 396 \AA^2 的孔隙面积时提供了最佳的排盐能力。设计的石墨烯膜可以再通过释放应变扩大孔径,从而清除污垢,使石墨烯膜成为反渗透海水淡化的理想候选者。

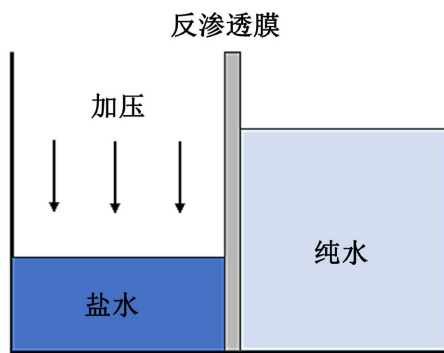


Figure 2. Schematic diagram of reverse osmosis water purification

图 2. 反渗透净水原理图

2.2. 基于热的处理技术

(1) 多级闪蒸

多级闪蒸是通过利用海水和淡水之间的沸点差异来实现淡化海水，令海水流过压力逐渐降低的闪蒸室进行闪蒸。如图 3 所示，在多级闪蒸系统中，海水首先经过一个预处理过程，去除悬浮物和有机物等杂质，然后进入一系列的加热器和蒸发器，其中每个加热器和蒸发器的压力都比前一个低。在每个蒸发器中，海水被加热至沸腾，并产生水蒸气，这些水蒸气经过冷凝器冷却后变成淡水。多级闪蒸系统的主要优点是可以处理大量的海水，并且具有较高的淡化效率，通常可以将盐分含量高达 35,000 毫克/升的海水转化为低于 500 毫克/升的淡水。此外，多级闪蒸系统还比其他海水淡化技术更加节能和环保。然而，多级闪蒸系统的建设和运行成本较高，通常需要大量的能源和水资源[21] [22]。

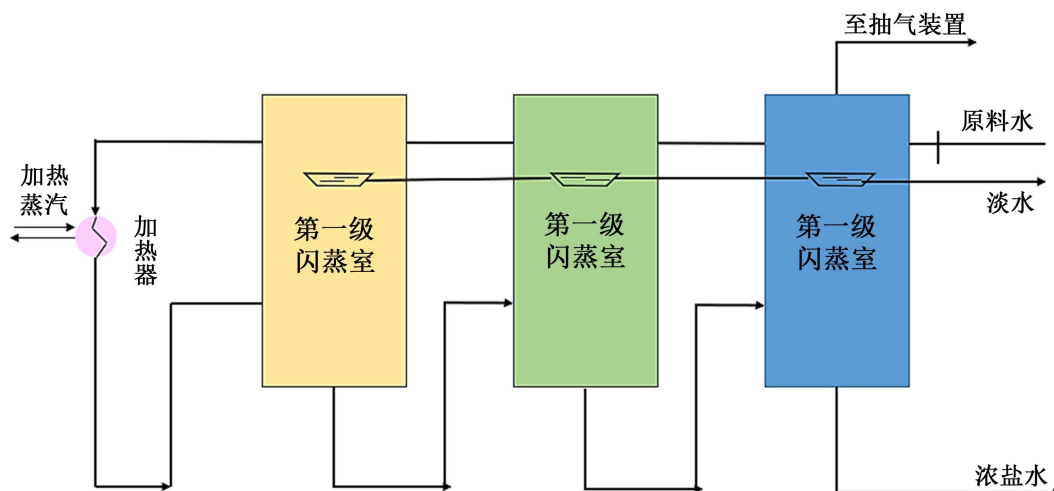


Figure 3. Working principle diagram of multi-stage flash evaporation

图 3. 多级闪蒸工作原理图

(2) 多效蒸馏

如图 4 所示，多效蒸馏系统由多个蒸馏器组成，每个蒸馏器都是在低于海水沸点的温度下加热和蒸发海水，收集并冷却产生的水蒸气，从而获得淡水。系统中每个蒸馏器都是前一个蒸馏器的压力和温度的一部分[23]。多效蒸馏系统通常使用蒸汽作为热源，来驱动多个蒸馏器。优点包括更高的淡化效率、更少的矿物质积累以及更小的能源消耗。多效蒸馏系统使用蒸汽作为热源，所以它们通常比多级闪蒸系统

更节能[24]。此外,多效蒸馏系统还可以处理一系列不同盐度的海水,从而使它们适用于各种不同的应用场景[25]。

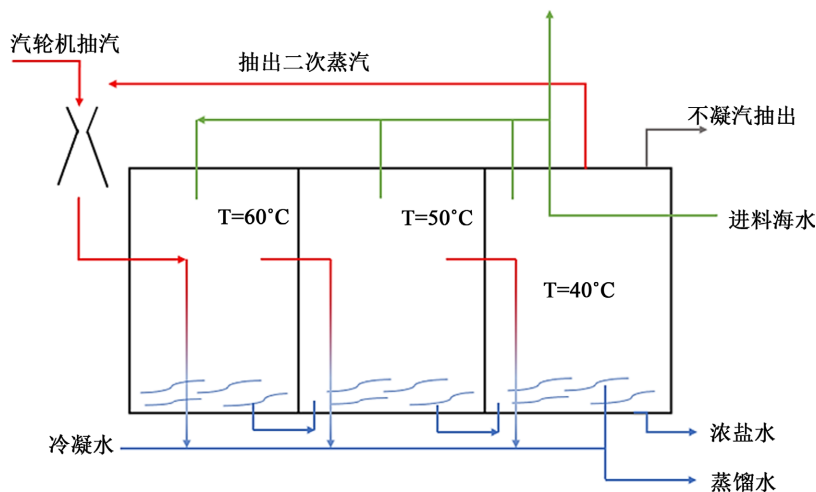


Figure 4. Working principle diagram of multi effect distillation
图 4. 多效蒸馏工作原理图

2.3. 基于太阳能的处理技术

目前,虽然反渗透、多级蒸馏等技术确实能够达到净化污水、淡化海水等,但它们仍然需要持续的高能耗和大型设施,不仅提高了使用成本,也有悖于我国碳中和的长远目标[26]。因此,基于可再生能源太阳能的净水技术正受到越来越多关注,成为缓解水资源短缺的有效方法。其中,基于太阳能蒸汽发电(SVG)的太阳能热驱动净水技术由于高效的太阳能热转换效率和较低的成本而优于其他技术[27]。在先前的研究中,一般将光热转换材料置于太阳能水蒸发系统的底部,吸收的太阳能转换为热能来加热容器内的水,容易造成大量的热损失。因此研究人员将光热转换材料位于液体表面进行界面蒸发,热能集中在空气/液体界面可以减少热损失,从而提高蒸发速率[28]。

3. 太阳能水处理技术主要材料

在自然阳光下(太阳强度 $\leq 1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)的 SVG 由于较低的太阳能吸收率和严重的热损失,自然 SVG 速率较慢。于是对自然阳光下高效 SVG 的需求持续增长,激发了对先进材料和结构设计的不懈追求。到目前为止,已经研究了各种光热转换材料,如金属材料、碳材料和高分子材料作为太阳能吸收剂。

3.1. 金属材料

众所周知,太阳辐射的光谱位于 295 至 2500 nm 的范围内。为了充分利用太阳辐射,用于高效太阳能收集的光学材料应该表现出强大的宽带吸收。在大量材料中,等离子体和纳米结构已被广泛研究用于太阳能转换。局部表面等离子体共振可以大大增强光学吸收,局部表面等离子体共振是由金属或高掺杂半导体(如 Au、Ag)制成的纳米结构中自由电子的集体振荡。通过金属纳米颗粒热电子的内部衰变进行的局部加热已应用于光热治疗、蒸汽生产和光伏器件设计,如金纳米颗粒,可以通过表面等离子体效应产生热量,从而显著提高环境温度。Wang 等[29]发现了使用纳米级三氧化钛(Ti_2O_3)作为太阳能-热转换的新型光吸收剂,相当小的带隙(约 0.1 eV)赋予了 Ti_2O_3 在全光谱范围内吸收太阳能的能力。由于纳米颗粒之间的光散射增强,当材料尺寸减小到纳米级时,可以提高传统体 Ti_2O_3 的光吸收能力。通过结合 Ti_2O_3 纳米颗粒的超小带隙和

纳米尺寸特征, 实现了近 100%的内部和大约 92%的外部光热转换效率, 优于大多数传统光热材料。因此, 基于 Ti_2O_3 纳米颗粒的薄膜在海水淡化和净化中显示出潜在的应用。Ibrahim 等人[30]使用一步溶剂热法合成了由垂直排列的 $\text{CuS}/\text{Sn}_2\text{S}_3$ 纳米片(3D CSS-NS MF)组成的异质结构, 这种结构和垂直排列的纳米片之间丰富的纳米腔大大提升了阳光收集效率, 并使水蒸气快速逸出。在 1 个太阳($1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)的光照下, 获得了 $1.42 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高水分蒸发率, 对应于 82.93%的效率。在废水处理应用中, 有机染料的有效去除率为 99.9%。证明了使用新型半导体基纳米复合材料作为有效光热材料在海水淡化和废水处理应用领域产生高性能太阳能蒸汽的潜力。

3.2. 碳材料

碳基材料, 尤其是石墨烯, 具有宽带吸收和光热性能良好的优势, 有望用于太阳能-热能转换。然而, 到目前为止, 具有优异全向光收集性能的石墨烯基光热材料仍然难以制得。为了开发高性能石墨烯基光热材料, Yoshikazu Ito 等[31]通过氮掺杂合成用于蒸汽生成的多功能 3D 多孔石墨烯, 在 250 至 2000 nm 的宽波长范围内表现出比传统碳材料(总反射率为 5%~10%)相对更低的总反射率和透明度, 进一步探究孔径与反射率、透明度与化学掺杂的关系, 得出单片约 $35 \mu\text{m}$ 厚的多孔 N 掺杂石墨烯是在宽光谱范围内完全吸收太阳能照明的最佳厚度, 可以通过热局部化有效地实现从阳光到高能蒸汽的能量转换, 能效高达 80%, 作为一种将阳光转化为热能的成本低效益高的方法, 在实际应用中前景广阔。除目前最受关注的石墨烯外, 生物炭蒸发器也逐渐开发用于高性能的太阳能驱动蒸气生成, Zhang 等人[32]开发了一种新型的多孔微藻生物炭太阳能界面蒸发器(MBSIE), 利用生物柴油生产过程中产生的微球藻的残留物合成了太阳能吸收层。基底由聚苯乙烯泡沫和吸水棉棒组成, 光吸收率达到 94.1%, 并且该材料含有 C-O 和 N-H 等亲水基团, 有利于水分的输送。在一个太阳光照强度下, MBSIE 的最大海水蒸发率为 $1.165 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 生产淡水的总溶解固体和盐度分别为 $265 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.06%, 淡水质量可以达到生活用水标准。

3.3. 高分子材料

水凝胶作为一种具有高度吸水性的聚合物, 在太阳能净水技术中发挥了关键的作用。水凝胶的吸水能力使其能够从含盐的水源中吸取大量的水分, 同时具有多孔结构和较高的热稳定性, 使其能够在太阳能的照射下进行有效的蒸发, 这样就可以从海水中通过太阳能驱动的蒸发-冷凝过程获得纯净的水。为了进一步提升水凝胶的性能, 复合水凝胶的研究也日益受到关注, 这种水凝胶由特殊的纳米材料和传统的水凝胶聚合物共同构成, 其中纳米材料可以增强水凝胶的光吸收能力和热稳定性, 从而提高其在太阳能驱动的净水系统中的性能。同时还通过添加特殊的交联剂和强化剂来改善水凝胶的结构稳定性和机械强度, 使得水凝胶能够在更广泛的环境条件下使用, 并且能够保持较长的使用寿命[33] [34]。Guo 等人[35]制备了一种炭黑沉积织物/水凝胶复合材料, 炭黑沉积无纺布层(CB@NF)表现出优异的光热转换性能, 用作上部光热层, 又将淀粉引入聚乙烯醇(PVA)中使杂化水凝胶具有相当大的吸水能力用于自漂浮和水传输, 在模拟阳光照射下其温度可在 15 分钟内提高 30.4°C 。此外, 淀粉的引入使 PVA 水凝胶具有良好的抗溶胀性能, 有助于在界面蒸发的连续供水下形成相对稳定的形状。该系统具有良好的蒸发性能、排盐性能和对污染物的高净化效率, 将成为缓解缺水的一个很有前途的候选系统。

此外, 气凝胶由于其三维多孔结构、重量轻、太阳能吸收强和隔热性能优异, 在太阳能发电方面引起了极大的关注。然而, 通常使用的复杂且昂贵的制备工艺, 以及相对较低的太阳能蒸汽产生率, 限制了广泛应用。Liu 等[36]以丝瓜为灵感, 采用交联和简单冷冻干燥的方法, 设计并制备了具有分级孔隙结构的电纺聚丙烯腈/碳纳米管(PAN/CNTs)纳米纤维气凝胶。纳米纤维基气凝胶结合了聚巴胺(PDA)和碳纳米管的协同光热效应, 达到 94.8%的高光吸收率。此外, 电纺纳米纤维形成的 3D 互连结构大大降低了蒸

发焔。该复合气凝胶在一个阳光下实现了 $2.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的快速蒸发率和 94.5% 的太阳能蒸汽转化效率，优于大多数已报道的基于电纺纳米纤维的太阳能蒸汽发生器。这种可扩展、环保且具有成本效益的气凝胶为高效生产清洁水提供了一种简单的方法。

4. 总结与展望

新型水处理技术为提供高效、可持续和环保的水处理解决方案提供了新的途径。反渗透和纳滤技术是目前最常用的水处理技术之一，特别适用于海水淡化和饮用水处理。基于可再生太阳能的水处理技术更具有可持续性、环保性和低成本的优势，特别适用于缺乏传统能源供应或电力网络的地区，并且在材料的选用方面也比较广泛。然而，这些技术的应用仍面临着一些挑战，包括技术的成本、可行性和规模化应用，未来的研究和发展将通过不断对净水材料的改进，使其能够更好地适应净水的应用环境，从而推动太阳能净水技术中更加广泛的应用。

参考文献

- [1] Ingjerd, H., Thomas, S. and Dennis, P. (2006) Anthropogenic Impacts on Continental Surface Water Fluxes. *Geophysical Research Letters*, **33**, 1-4. <https://doi.org/10.1029/2006GL026047>
- [2] Falkenmark, M. (2003) Freshwater as Shared between Society and Ecosystems: From Divided Approaches to Integrated Challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, **358**, 2037-2049. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1386>
- [3] Qadir, M., Sharma, B.R., Bruggeman, A., et al. (2006) Non-Conventional Water Resources and Opportunities for Water Augmentation to Achieve Food Security in Water Scarce Countries. *Agricultural Water Management*, **87**, 2-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.018>
- [4] Feng, L., Zhang, Z.Y., Mai, Z.H., et al. (2004) A Super-Hydrophobic and Super-Oleophilic Coating Mesh Film for the Separation of Oil and Water. *Angewandte Chemie*, **43**, 2012-2014. <https://doi.org/10.1002/anie.200353381>
- [5] Foght, J.M., Gutnick, D.L. and Westlake, D.W. (1989) Effect of Emulsan on Biodegradation of Crude Oil by Pure and Mixed Bacterial Cultures. *Applied and Environmental Microbiology*, **55**, 36-42. <https://doi.org/10.1128/aem.55.1.36-42.1989>
- [6] 卢兴洁. 环保工程水处理过程中的超滤膜技术应用[J]. 清洗世界, 2023, 39(3): 28-30.
- [7] 陈倩倩. 浸没式超滤膜运行工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [8] Cheng, X.X., Li, P.J., Zhu, X.W., et al. (2021) Role of Different Dimensional Carbon Nanoparticles in Catalytic Oxidation of Organic Pollutants and Alleviating Membrane Fouling during Ultrafiltration of Surface Water. *Separation and Purification Technology*, **270**, Article ID: 118804. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118804>
- [9] Song, W.X., Gao, Z.M., Tan, F.X., et al. (2023) Calcium Sulfite Oxidation Activated by Ferrous Iron Integrated with Membrane Filtration for Removal of Typical Algal Contaminants. *Chemosphere*, **333**, Article ID: 138956. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138956>
- [10] Liu, S.H., Jiang, H.T., Li, Y.Y., et al. (2023) Construction of Tight Ultrafiltration Membrane for Efficient Dye/Salt Separation with Physical and Chemical Self-Healing Property. *Chemical Engineering Journal*, **467**, Article ID: 143456. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143456>
- [11] Hai, W., Ling, W., Wen, X., et al. (2023) Preparation of a CAB-GO/PES Mixed Matrix Ultrafiltration Membrane and Its Antifouling Performance. *Membranes*, **13**, Article 241. <https://doi.org/10.3390/membranes13020241>
- [12] 张祥波. 新型纳滤膜的制备及其在水处理中的应用[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2014.
- [13] 高玉婷. 给水处理用纳滤/反渗透膜元件性能评估研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2021.
- [14] 董蕾茜. 基于原位植入法的纳米材料改性超滤膜和纳滤膜制备研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2015.
- [15] 赵长伟, 唐文晶, 贾文娟, 等. 纳滤去除水中新兴污染物的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2021, 41(1): 144-151.
- [16] W, X.L., Xue, Y.X., Dong, S.Q., et al. (2023) Poly (Caffeic Acid) as Interlayer to Enhance Nanofiltration Performance of Polyamide Composite Membrane. *Desalination*, **545**, Article ID: 116168. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116168>
- [17] Zhang, X.Z., Li, T.Y., Wang, Z., et al. (2023) Polar Aprotic Solvent-Resistant Nanofiltration Membranes Generated by Flexible-Chain Binding Interfacial Polymerization onto PTFE Substrate. *Journal of Membrane Science*, **668**, Article

ID: 121294. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121294>

- [18] Ali, A., Tufa, A.R., Macedonio, F., *et al.* (2018) Membrane Technology in Renewable-Energy-Driven Desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **81**, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.047>
- [19] 崔丽桃, 赵云, 李海锋. 化工废水处理中反渗透膜污染的产生及清洗分析[J]. 清洗世界, 2023, 39(4): 22-24.
- [20] Ho, D.T., Nguyen, T.P.N., Jangir, A., *et al.* (2023) Graphene foam Membranes with Tunable Pore Size for Next-Generation Reverse Osmosis Water Desalination. *Nanoscale Horizons*, **8**, 1082-1089. <https://doi.org/10.1039/D2NH00475E>
- [21] 冯厚军, 谢春刚. 中国海水淡化技术研究现状与展望[J]. 化学工业与工程, 2010, 27(2): 103-109.
- [22] Lv, H.H., Wang, Y., Wu, L.Y., *et al.* (2019) Numerical Simulation and Optimization of the Flash Chamber for Multi-Stage Flash Seawater Desalination. *Desalination*, **465**, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.04.032>
- [23] Labelle, S. (2007) Desalination of Seawater. American Water Works Association, Washington, DC, 7-8.
- [24] 周少祥, 马燕南. 热电联产低温多效蒸馏海水淡化化系统的节能分析[J]. 热能动力工程, 1997(3): 5-7+78.
- [25] Al-Hotmani, O.M.A., Al-Obaidi, M.A., Patel, R., *et al.* (2019) Performance Analysis of a Hybrid System of Multi Effect Distillation and Permeate Reprocessing Reverse Osmosis Processes for Seawater Desalination. *Desalination*, **470**, Article ID: 114066. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.07.006>
- [26] 何楠, 李佳音, 张亚琼. 碳中和目标下水环境协同治理研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(5): 108-114.
- [27] Mu, X., Gu, Y., Wang, P., *et al.* (2021) Strategies for Breaking Theoretical Evaporation Limitation in Direct Solar Steam Generation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **220**, Article ID: 110842. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110842>
- [28] 徐佑森, 张振, 唐彪, 等. 基于 Ti_3C_2 -MXene 的太阳能界面水汽转换[J]. 化学进展, 2021, 33(11): 2033-2055.
- [29] Wang, J., Li, Y.Y., Deng, L., *et al.* (2017) High-Performance Photothermal Conversion of Narrow-Bandgap Ti_2O_3 Nanoparticles. *Advanced Materials*, **29**, Article ID: 1603730. <https://doi.org/10.1002/adma.201603730>
- [30] Ibrahim, I., Seo, D.H., Angeloski, A., *et al.* (2021) 3D Microflowers CuS/Sn_2S_3 Heterostructure for Highly Efficient Solar Steam Generation and Water Purification. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **232**, Article ID: 111377. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111377>
- [31] Ito, Y., Tanabe, Y., Han, J.H., *et al.* (2015) Multifunctional Porous Graphene for High-Efficiency Steam Generation by Heat Localization. *Advanced Materials*, **27**, 4302-4307. <https://doi.org/10.1002/adma.201501832>
- [32] Zhang, Q., Zhang, Y., Shen, Y., *et al.* (2021) Improving Seawater Desalination Efficiency by Solar Driven Interfacial Evaporation Based on Biochar Evaporator of *Nannochloropsis oculata* Residue. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9**, Article ID: 105787. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105787>
- [33] Alketbi, A.S., Raza, A., Sajjad, M., *et al.* (2021) Direct Solar Vapor Generation with Micro-3D Printed Hydrogel Device. *EcoMat*, **4**, e12157. <https://doi.org/10.1002/eom2.12157>
- [34] Chen, X., Li, P., Wang, J., *et al.* (2022) Multishelled CuO/Cu_2O Induced Fast Photo-Vapour Generation for Drinking Water. *Nano Research*, **3**, 4117-4123. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-4063-y>
- [35] Guo, Y., Li, C., Wei, P., *et al.* (2022) Scalable Carbon Black Deposited Fabric/Hydrogel Composites for Affordable Solar-Driven Water Purification. *Journal of Materials Science & Technology*, **106**, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.07.032>
- [36] Liu, Y., Liu, H., Xiong, J., *et al.* (2022) Bioinspired Design of Electrospun Nanofiber Based Aerogel for Efficient and Cost-Effective Solar Vapor Generation. *Chemical Engineering Journal*, **427**, Article ID: 131539.