

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.24.005

太阳能驱动反渗透技术用于海水淡化的研究进展

高 瑞¹, 刘彩虹¹, 周艺凡¹, 刘乾亮², 宋 丹³, 何 强¹,
马 军³

(1. 重庆大学环境与生态学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 哈尔滨理工大学 化学与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 3. 哈尔滨工业大学环境学院 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 反渗透(RO)海水淡化技术是解决水资源长期短缺问题的有效途径,尽管现在的研究已使反渗透效率逐步提高,但其仍是一个能源密集型过程,并且以化石燃料为海水淡化的驱动力会加快能源短缺、导致环境污染等问题。因此,将目前具有较大开拓空间和潜力的太阳能作为海水淡化的驱动力来打破传统海水淡化对化石燃料的依赖,降低运营成本,改善环境可持续性。以海水淡化技术的研究概况为基础,探讨了反渗透膜技术和太阳能在海水淡化领域的应用现状,进一步聚焦目前太阳能驱动反渗透技术的前沿领域,如光伏反渗透海水淡化系统、有机朗肯循环驱动反渗透海水淡化系统和混合式太阳能反渗透海水淡化系统等主流太阳能-反渗透耦合海水淡化技术,详细探讨了这些技术的研究进展、原理与特点、面临的挑战与困难,并对未来研究工作提出建议和展望。

关键词: 海水淡化; 反渗透; 太阳能; 光伏; 有机朗肯循环

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)24-0033-07

Research Progress of Solar-driven Reverse Osmosis Technology Applied in Seawater Desalination

GAO Rui¹, LIU Cai-hong¹, ZHOU Yi-fan¹, LIU Qian-liang², SONG Dan³,
HE Qiang¹, MA Jun³

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, College of Environmental and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. College Chemistry & Environment Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China; 3. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Reverse osmosis (RO) desalination technology is an effective solution to the persistent issue of long-term water scarcity. Although the current research has gradually improved the efficiency of reverse osmosis, it is still an energy-intensive process and fossil fuels as the driving force of desalination will accelerate energy shortages and lead to environmental pollution. Alternatively, solar energy, which currently abundant in potential, can be used as a driving force for desalination, thereby reducing dependence on fossil fuels, lowering operational costs, and promoting environmental sustainability. This

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52100024)

通信作者: 刘彩虹 E-mail: caihong.liu@cqu.edu.cn

paper firstly briefly introduces the research overview of seawater desalination technology, and explores the application of reverse osmosis membrane technology alongside solar energy in the field of seawater desalination. It subsequently delves into cutting-edge developments in solar-driven reverse osmosis technology, mainly targeting on the mainstream solar–reverse osmosis coupled desalination technologies, including photovoltaic–reverse osmosis desalination system, organic Rankine cycle driving reverse osmosis desalination system and hybrid solar–reverse osmosis desalination system. This paper discusses in detail their research progress, principles and characteristics, and challenges and difficulties. Additionally, relevant suggestions and prospects for future research work are also proposed.

Key words: seawater desalination; reverse osmosis; solar energy; photovoltaic; organic Rankine cycle

目前,海水淡化技术已逐步发展完善,应用最为广泛的工艺包括低温多效蒸馏(LT-MED)、多级闪蒸(MSF)和反渗透(RO)膜法。其中,反渗透膜法具有能耗较低、操作简便、环保性能好等特点,被认为是目前较为可靠的海咸水淡化技术。此外,海水淡化技术的能耗也是近年来研究的热点。海水淡化是能源密集型产业,需要消耗大量能源将溶解性盐从海水中去除而产出淡水。当前广泛使用的是常规能源,主要包括煤炭、石油和天然气等,然而,常规能源的大量消耗将增加环境污染和温室气体排放量,不利于全球环境保护和可持续生态发展。预计到2050年,用于海水淡化化石燃料产生的碳排放当量高达 4×10^8 t/a^[1],因此开拓太阳能、风能、水能等可再生能源作为海水淡化的驱动力具有显著的应用前景和研究价值。其中,太阳能作为一种辐射能,清洁并且取之不尽,是极佳的可再生能源^[2],加之太阳能覆盖面积广、资源丰富,也不会对环境造成二次污染,具有很高的开发利用价值,因此受

到越来越多的关注。基于以上背景,探讨了太阳能驱动反渗透用于海水淡化的研究进展,以期为新能源在海水淡化领域的应用提供参考。

1 海水淡化技术的研究概况

1.1 海水淡化主要工艺形式

海水淡化是指通过一定的技术手段,将海水中溶解性矿物质盐分、有机物、细菌、病毒以及固体颗粒分离出去,产出淡水的过程。从能量转换角度来讲,海水淡化是将其他能源(如热能、机械能、电能等)转化为盐水分离能的过程。脱盐工艺分为膜法和热法两种主要类型,其中,膜过程脱盐使用的膜具有独特性能,如电渗析(ED)中的离子选择性、RO的半渗透性和膜蒸馏(MD)的水蒸气透过性;另一类热过程脱盐是基于相变工艺,即利用热能对海水或者咸水加热产生蒸汽,蒸汽冷凝后即可实现脱盐,如多效蒸发(MED)、MSF、压汽蒸馏(VC)等。

目前,主流海水淡化工艺的形式及其原理、特点如表1所示。

表1 主流海水淡化工艺的原理及特点

Tab.1 Mechanism and characteristics of mainstream seawater desalination processes

海水淡化工艺		原理	优点	缺点
热法	多效蒸馏法(MED)	串联多个蒸发器以节省热量	对原料海水水质要求低、热效率高、操作弹性大	设备体积大、装置费用高
	多级闪蒸技术(MSF)	多个蒸发容器串联而成,串联的容器内压递减,实现闪蒸汽化	单机容量大	工程投资高、动力消耗大、设备的操作弹性小
	压汽蒸馏(VC)	通过压缩机增压的蒸汽进行热交换,实现冷凝产水	对原料海水水质要求低、装置的生产能力大	能耗大、设备费用高、装置规模受压缩机容量限制
膜法	电渗析(ED)	利用电驱动膜的选择透过性,使离子从一侧水迁移到另一侧水中	工艺简单、除盐率高、操作方便	能耗大,对原料海水要求严格,不能去除非导电物质
	反渗透(RO)	利用半透膜将淡水与盐分物质进行分离	无相变变化、常温、节能、设备操作简单	预处理投资高、二次污染、膜易损坏
	正渗透(FO)	利用膜两侧渗透压差使水分子穿越半透膜,实现盐水分	无需外界压力,能耗低、无二次污染	汲取液再生问题、浓差极化、溶质返混

此外,还有不同的新兴技术,包括膜蒸馏、电容去离子化、气体水合物、加湿除湿,这些技术也可与超滤、纳滤和离子过滤技术耦合应用于海水淡化。迄今为止,MED、MSF和RO仍然占据海水淡化技术的主导地位,总占比高达93%^[3](见图1)。其中,65%的海水淡化通过反渗透获得;与其他海水淡化技术相比,反渗透技术较为节能,同时还具有常温操作、设备简单等优点,已成为海水淡化主流技术。

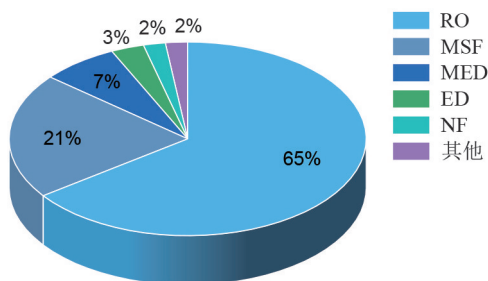


图1 不同海水淡化技术的世界总装机分布

Fig.1 World distribution of different desalination technologies

1.2 RO工艺在海水淡化中的应用

反渗透海水淡化(Seawater Reverse Osmosis, SWRO)工艺是目前应用最为广泛的低成本和可持续发展的淡水资源化技术,与直接蒸发的热法海水淡化过程相比,反渗透膜法所需能耗明显降低,但包括耗材和能耗在内的成本问题依然限制了其进一步的推广应用。基于此,针对反渗透膜材料的制备与应用开展了大量探索研究。有研究提出,通过掺杂功能化添加剂来制备高性能反渗透膜,如将功能化纳米材料(碳纳米管、纳米银、分子筛等)引入聚酰胺膜的超薄活性层中,以增强膜表面亲水性,提高分离性能和产水量^[4]。此外,随着高效泵和能量回收装置(ERDs)的发展,SWRO系统的能耗也大大降低^[5]。研究表明,通过开发能量回收设备、节能泵、高性能膜和优化膜块设计,SWRO过程的单位能耗从20 kW·h/m³(1970年)下降到2.5 kW·h/m³(2010年)^[6]。尽管反渗透膜材料制备与系统设计有所改进,但运行过程中随着给水盐度或给水回收率的增加,海水淡化所需的最低能耗也随着运行时间的延长逐渐增加。因此,反渗透成本很大一部分仍停留在进水加压所需的电能上^[7]。例如,对于盐度为35 000 mg/L的海水,在50%的回收率下,最小理论能耗约为1.07 kW·h/m³,但在实际海水淡化过程中(包括

前处理和后处理)总能量需求约为3~6 kW·h/m³,可见SWRO过程在降低能耗方面仍有改进的空间。

1.3 太阳能在海水淡化中的应用

目前,全球能源危机日趋严重,以化石燃料为动力的海水淡化技术消耗了大量能量,并对环境造成严重破坏,寻找可持续、低污染的能源对于海水淡化至关重要。在众多可再生能源中,太阳能尤其受到关注。图2列举了太阳能在海水淡化技术中的应用情况^[8]。对太阳辐射的应用可分为直接利用和间接利用两种:对于直接利用,可通过直接集热系统(如真空管集热器)聚焦辐射加热,将太阳辐射转化为热能,为多级闪蒸、多效蒸馏和热力压汽蒸馏等海水淡化过程直接供能;或利用光伏发电等方式将太阳辐射转化为电能,再利用电能驱动反渗透、电渗析、频繁倒极电渗析等装置进行海水淡化。对于间接利用,可通过有机朗肯循环等方式将太阳热能转化为机械能或电能驱动反渗透中的高压泵,进而驱动脱盐过程。太阳能海水淡化通过减少或消除对化石燃料的依赖来提高其可持续性,是满足偏远地区供水需求的一种有前景的方式,有利于生态环境可持续发展。

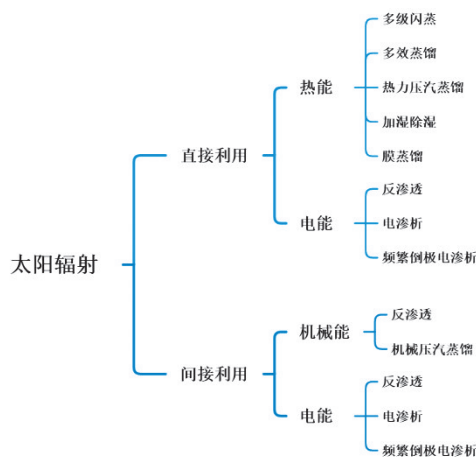


图2 太阳能在海水淡化中的应用

Fig.2 Application of solar energy in seawater desalination

2 太阳能驱动SWRO技术研究进展

随着太阳能应用的逐渐成熟,在无商用电源或电力紧张的地区利用太阳能淡化海水、苦咸水成为可能。据统计,可再生能源反渗透海水淡化厂中,有43%为太阳能光伏发电,27%为有机朗肯循环太阳能热发电^[9]。此外,也有混合式能源用于反渗透海水淡化。

2.1 光伏反渗透(PV-RO)海水淡化系统

PV-RO海水淡化系统将光伏发电与反渗透海水淡化技术相结合,就地利用太阳能辐射,由光伏阵列将太阳能转化为电能,用于驱动反渗透进行海水淡化,为合理利用太阳能资源提供了新的途径,同时对生态环境起到了更好的保护作用^[10]。PV-RO系统最早的工程项目出现在20世纪80年代,其结构^[11]如图3所示。

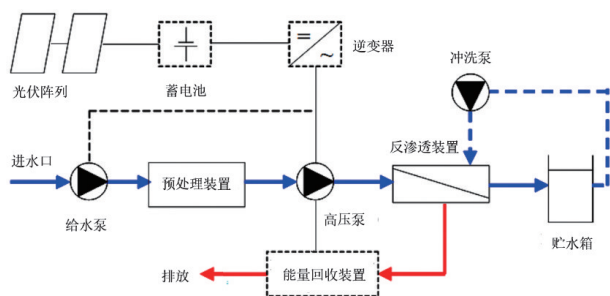


图3 PV-RO海水淡化系统示意

Fig.3 Schematic diagram of PV-RO seawater desalination system

该系统主要包括蓄水单元、预处理单元、反渗透单元、太阳能光伏阵列、逆变器及能量回收装置,海水由提升泵提取,先经过杀菌、过滤、软化等预处理,再由高压泵加压后进入反渗透装置^[12]。当压力大于膜的渗透压时,水分子通过反渗透膜而成为淡水,并收集在贮水箱中,溶质则被截留下来。反渗透膜处理后的浓水压力高达4.0~6.0 MPa,通常经能量回收装置处理后排放,可显著提高系统的能量利用率。小型装置一般不设置能量回收系统,浓水可通过调压阀直接排出(图3中虚线所示)。

PV-RO海水淡化系统的单位能耗主要取决于以下几个方面:

① 进水预处理工艺。实际海水中存在大量硫酸盐、硅酸盐等难溶于水的盐和泥沙,真菌、霉菌、藻类等微生物以及其他杂质,如果未经预处理的海水直接进入膜组件,将使膜在短时间内受到严重污染并需频繁更换膜组件,从而导致经济成本过高。因此,考虑到系统的长期稳定运行,防止严重膜污染造成的膜组件频繁更换,在海水进入反渗透膜组件前,应进行相应严格有效的预处理,如在预处理单元增设斜管沉淀池、清水池、絮凝沉淀池、加药系统、无阀过滤池等。

② 光伏组件。光伏组件作为光伏系统中最

为重要的组成部分,其性能严重影响光伏系统的效率。光伏模块的方向(固定或可调节)被认为是决定电力输出的重要因素,决定了海水淡化厂的整体性能。固定轴模块的设计使其仅能以预设恒定角度进行倾斜,而具有可调轴的模块可以根据季节变化手动重新定位,或者安装带有控制器和驱动电机的跟踪系统,模块可以自动跟随太阳在天空中的日常路径,从而极大提升了光伏系统的整体发电效率。Harrison等^[13]确定,在容量为0.05 m³/d的小型海水淡化器中,跟踪太阳能电池阵列产生的渗透流量比固定阵列高60%。然而,安装轨道系统所需的高昂投资成本限制了其在PV-RO海水淡化中的使用。通常安装最大功率点跟踪器(MPPT)电路以保持系统在最大功率的电压下运行,同时确保低辐照度条件下的效率,大大提升了对太阳辐射的利用。

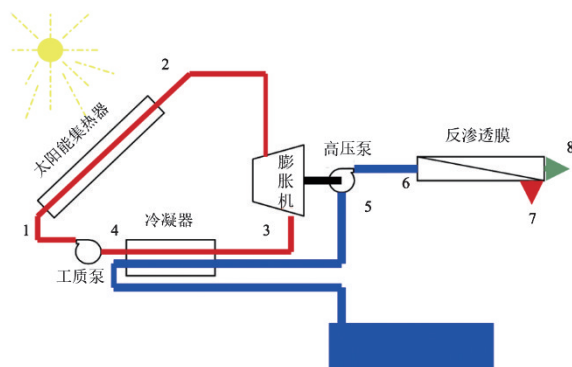
③ 电池。由于光伏发电受能源收集的影响,可能导致潜在的发电过剩或供应不足,因此需要电能存储设备提高能源可靠性。在应用过程中,多余的电能可以在电池中储存一段时间,储存的电能可以在低发电量期间释放出来。Kim等^[14]发现,PV-RO在生产能力为150 m³/d时,有电池系统的单位水成本比无电池系统降低了30%。而Shalaby^[10]提出,电池的选型需要考虑电池存储容量、脱盐负荷、所需的光伏额定值、日输出功率以及估计的光伏阵列尺寸等因素,因此在考虑资本和运营成本的情况下,小型的反渗透海水淡化厂不建议使用带有电池的PV-RO系统。

④ 能量回收装置。高压泵是反渗透系统中能耗和成本占比最大的部分,反渗透海水淡化的运行压力通常为5.8~7.0 MPa,所排放的浓海水压力高达5.5~6.5 MPa,仍含有60%左右的余压能(按照淡水回收率40%计算),对这一部分能量进行回收利用可大大降低反渗透海水淡化系统的能耗。目前,反渗透能量回收方式主要分为水力透平式(PWT)和压力交换器式(PES),能量回收效率分别可达50%~80%、90%~97%^[15]。

面向PV-RO系统的进一步推广应用,对于光伏而言,仍然需要通过开发价格更便宜的储能设备或电池来解决太阳能作为可变能源的问题。在反渗透系统中,可以选择性能更好的膜、更高效的高压泵与能量回收装置来提高产水率和降低能源消耗。

2.2 有机朗肯循环驱动反渗透(ORC-RO)系统

有机朗肯循环是一种小规模机械能转化技术,由于其在分布式发电系统中的集成潜力,以及相较于传统蒸汽动力可开发低温热源的优点,近年来受到了越来越多的关注。有机朗肯循环驱动反渗透海水淡化是指反渗透淡化所需的高压泵由电驱动改为膨胀机直接机械驱动,其工作原理^[16]如图4所示。



1. 进入太阳能场的工作流体 2. 最高温度和压力(蒸汽)的工作流体
3. 膨胀蒸汽 4. 冷凝流体 5. 6. 海水 7. 浓海水 8. 淡水

图4 由太阳能驱动有机朗肯循环供电的反渗透系统示意

Fig.4 Schematic diagram of a RO system powered by a solar-driven organic Rankine cycle

太阳能集热器产生的热能促使朗肯发动机蒸发器表面的制冷剂蒸发,使得过热蒸汽被驱动到膨胀机,膨胀机膨胀产生的机械功进而驱动反渗透系统的高压泵运行,膨胀机出口处的蒸汽则被导向冷凝器,然后用工质泵对冷凝器出口处的冷凝流体进行加压,重复上述热力循环。

目前,对 ORC-RO 的研究和分析主要包括以下两个方面:

① 太阳能集热器的选择与应用。太阳能集热器将太阳辐照度转化为热能,然后将其输送到存储设备供后续使用,其分类^[17]见图5。根据太阳能循环效率的理想值,抛物面聚光集热器(PTC)和线性菲涅耳聚光器可在最高温度为350℃的系统中运行,而真空管太阳集热器(ETC)和带真空接收器的复合抛物线聚光器建议在最高温度为100~150℃的系统中运行。如果系统最高温度低于100℃,则可以使用平板太阳集热器(FPC)。在此情况下,与ETC相比,应该评估FPC产生的太阳能场的热能输出,因为太阳能收集器效率对太阳辐照度和入射角的依赖性不同。

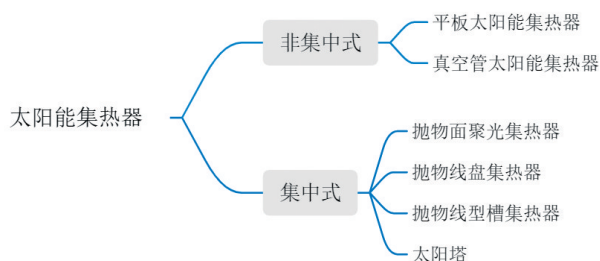


图5 太阳能集热器分类

Fig.5 Classification of solar thermal collector

② ORC-RO 系统有机工质的选择与应用。太阳能朗肯循环的工作流体对循环效率有显著影响,有机流体的选择基准主要分为:分子质量和P-T响应^[18],沸点和熔点^[19],热效率^[20]等。Thuraiiraja等^[21]发现不同的流体在特定的温度范围内能够有效地从热源中提取热功率,从而实现最高的热效率。其中,环戊烷和十甲基四硅氧烷的最佳温度为50~100℃,丁烷、五氟丙烷和新戊烷为100~150℃,汽油、丙酮和甲醇则为150~200℃,水、对二甲苯和间二甲苯为200~320℃。Delgado-Torres等^[22]研究了带反渗透单元的太阳能双级有机朗肯循环系统的性能,用甲苯和六甲基二硅氧烷作为顶部循环的工作流体,用异戊烷作为底部循环的工作流体,顶部循环的输出功率用于运行反渗透装置的高压泵,底部循环产生的功率用于运行辅助设备,底部循环排出的热量用于预热进入反渗透单元的给水,结果发现该系统的性能优于由光伏电池驱动的常规系统。

Manolakos等^[23]对由光伏板供电的PV-RO系统和由太阳能朗肯循环供电的ORC-RO系统进行了技术经济比较:PV-RO中光伏系统由18个总峰值功率为846W的光伏面板连接510W的直流电动机组成,能耗为2.44 kW·h/m³,占总成本的31%;ORC-RO中太阳能朗肯系统由90 m²的真空管集热器和100 kW的朗肯发动机组成,能耗为8.29 kW·h/m³,占总成本的66%。预估ORC-RO系统单位水成本为12.5美元/m³,而PV-RO单位水成本为7.8美元/m³。

有机朗肯循环结构简单、易于操作、热力学效率高,是利用低品位余热和可再生能源最有前途的技术之一。然而,基于不同热源和冷却设施确定低沸点温度的工质是最具有挑战性的问题之一,在未来的研究中需要提出一种根据纯工质和混合工质

来评估 ORC 性能的方法,并使其商业化,在最大限度地提高效率的前提下降低发电成本。

2.3 混合式太阳能反渗透海水淡化技术

混合式太阳能反渗透海水淡化的设计是通过将太阳能发电能力与其他可再生能源发电结合实现最优应用,辅助能源产生的电力可用于延长每日运行的小时数^[24]或作为备用电源,以确保在太阳低辐射或间歇性辐射期间维持系统稳定运行。

在有利的气象条件下,太阳能风力反渗透系统的成本低于太阳能反渗透海水淡化系统的成本^[11]。Mohamed 等^[25]对 12 m³/d 的自动脱盐系统进行了研究,发现混合光伏风力发电系统的实际成本为 7.67 美元/m³,而全光伏发电装置的实际成本为 9.77 美元/m³。Malisovas 等^[26]基于海水淡化厂运行中电池存储、水存储以及智能电网的动态能量交换平衡关系,提出了一种由风-光-电池组合供电并与智能电网结合的海水淡化厂系统运行方法,大大降低了海水淡化厂的总生命周期成本,提高了海水淡化系统的运行经济性。袁凌等^[27]在传统单一能源获取方法的基础上,建立以高可靠性风力发电机组为主,光伏发电为辅,集发电、储能和海水淡化相互耦合的岛屿独立能量循环系统,形成一种多清洁能源综合利用和能量互补的解决方案,促进了海岛智能发展与高效利用。

综上,混合式太阳能反渗透技术可以更合理、有效地利用可再生能源,弥补了太阳辐射间歇性的问题,能够更好地将太阳能运用于海水淡化。现阶段储能方式多种多样,需要根据实际地理条件组合不同的储能方式来实现能量互补,这就大大增加了前期的技术成本,也限制了其进一步发展。并且,目前混合式太阳能反渗透技术多运用于海岛这种远离陆地的极端情况,如何实现系统自我诊断、预警,为提前维护做出指导也是未来研究的重点。

3 结语

作为最经济的绿色可再生能源,太阳能为反渗透海水淡化提供动力是当前行业的发展趋势,但还有一部分问题亟待解决:①具有高效率的能量回收装置;②太阳能海水淡化副产品的处理(如余热和浓海水等);③太阳能电池材料等。未来太阳能反渗透海水淡化将朝着低成本、高效能、高稳定性的方向发展,能量回收装置效率的提高、先进膜材料

和设备的发展,将大大提高太阳能反渗透海水淡化技术的产水率。此外,将太阳能与其他可再生能源耦合,实现供能系统的优化,可进一步推进太阳能反渗透海水淡化产业的商业化与规模化。

参考文献:

- [1] DELGADO W R, BEACH T, LUZZADDER-BEACH S. Solar desalination: cases, synthesis, and challenges [J]. WIREs Water, 2020, 7(3): e1434.
- [2] LI Z T, XU X T, SHENG X R, *et al.* Solar-powered sustainable water production: state-of-the-art technologies for sunlight-energy-water nexus [J]. ACS Nano, 2021, 15(8): 12535-12566.
- [3] BURN S, HOANG M, ZARZO D, *et al.* Desalination techniques—a review of the opportunities for desalination in agriculture [J]. Desalination, 2015, 364: 2-16.
- [4] LIN S, ZHAO H, ZHU L, *et al.* Seawater desalination technology and engineering in China: a review [J]. Desalination, 2021, 498: 114728.
- [5] YOUSRY A, RIDWAN M G, ALTMANN T, *et al.* Performance model for reverse osmosis [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2022, 186: 416-432.
- [6] PARK K, KIM J, YANG D R, *et al.* Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: a review and theoretical analysis for future directions [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 595: 117607.
- [7] 叶华,陈斌伟. 利用可再生能源的反渗透膜法海水淡化方案探讨[J]. 净水技术, 2014, 33(2): 27-30.
YE Hua, CHE Binwei. Discussion of seawater desalination schemes through RO process with renewable energy sources [J]. Water Purification Technology, 2014, 33(2): 27-30(in Chinese).
- [8] AHMED F E, HASHAIKEH R, HILAL N. Solar powered desalination—technology, energy and future outlook [J]. Desalination, 2019, 453: 54-76.
- [9] RAHIMI B, SHIRVANI H, ALAMOLHODA A A, *et al.* A feasibility study of solar-powered reverse osmosis processes [J]. Desalination, 2021, 500: 114885.
- [10] SHALABY S M. Reverse osmosis desalination powered by photovoltaic and solar Rankine cycle power systems: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 789-797.
- [11] GHERMANDI A, MESSALEM R. Solar-driven

- desalination with reverse osmosis: the state of the art [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 7(1/3): 285–296.
- [12] 赵云鹏, 姜海波. 光伏反渗透海水淡化装置的设计与优化 [J]. *中国给水排水*, 2012, 28(1): 77–80.
ZHAO Yunpeng, JIANG Haibo. Design and optimization of photovoltaic RO seawater desalination device [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(1): 77–80(in Chinese).
- [13] HARRISON D G, HO G E, MATHEW K. Desalination using renewable energy in Australia [J]. *Renewable Energy*, 1996, 8(1/4): 509–513.
- [14] KIM J, HAMZA K, EL-MORSI M, *et al.* Design optimization of batteryless photovoltaic-powered reverse osmosis water desalination in remote areas [C]//ASME. *Proceedings of International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. Canada: ASME, 2014: 37750.
- [15] 刘秀龙. 有机朗肯循环驱动反渗透海水淡化复合系统研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
LIU Xiulong. Research on the Composite System of Reverse Osmosis Seawater Desalination-driven by Organic Rankine Cycle [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2018(in Chinese).
- [16] GARCÍA-RODRÍGUEZ L, DELGADO-TORRES A M. Solar-powered Rankine cycles for fresh water production [J]. *Desalination*, 2007, 212(1/3): 319–327.
- [17] GUPTA P R, TIWARI A K, SAID Z. Solar organic Rankine cycle and its poly-generation applications—a review [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 49: 101732.
- [18] DELGADO-TORRES A M, GARCIA-RODRIGUEZ L. Preliminary assessment of solar organic Rankine cycles for driving a desalination system [J]. *Desalination*, 2007, 216(1/3): 252–275.
- [19] HETTIARACHCHI H D M, GOLUBOVIC M, WOREK W M, *et al.* Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources [J]. *Energy*, 2007, 32(9): 1698–1706.
- [20] BRUNO J C, LOPEZ-VILLADA J, LETELIER E, *et al.* Modelling and optimisation of solar organic Rankine cycle engines for reverse osmosis desalination [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28 (17/18): 2212–2226.
- [21] THURAIRAJA K, WIJEWARDANE A, JAYASEKARA S, *et al.* Working fluid selection and performance evaluation of ORC [J]. *Energy Procedia*, 2019, 156: 244–248.
- [22] DELGADO-TORRES A M, GARCIA-RODRIGUEZ L. Double cascade organic Rankine cycle for solar-driven reverse osmosis desalination [J]. *Desalination*, 2007, 216(1/3): 306–313.
- [23] MANOLAKOS D, MOHAMED E S, KARAGIANNIS I, *et al.* Technical and economic comparison between PV–RO system and RO–solar Rankine system. Case study: Thirasia island [J]. *Desalination*, 2008, 221 (1): 37–46.
- [24] HELAL A M, AL-MALEK S A, AL-KATHEERI E S. Economic feasibility of alternative designs of a PV–RO desalination unit for remote areas in the United Arab Emirates [J]. *Desalination*, 2008, 221(1/3): 1–16.
- [25] Mohamed E S, Papadakis G. Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics [J]. *Desalination*, 2004, 164 (1): 87–97.
- [26] MALISOVAS A, KOUTROULIS E. Design optimization of RES-based desalination systems cooperating with smart grids [J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(4): 4706–4717.
- [27] 袁凌, 桑鹏飞, 员一泽, 等. 基于风力发电机组的离岸岛屿能量循环系统 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39 (9): 2569–2575.
YUAN Ling, SANG Pengfei, YUAN Yize, *et al.* Offshore island energy cycle system based on wind turbine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39 (9): 2569–2575(in Chinese).

作者简介: 高瑞(1998–), 女, 江苏徐州人, 硕士在读, 研究方向为膜法水处理。

E-mail: 18252087468@163.com

收稿日期: 2023-01-04

修回日期: 2023-02-03

(编辑: 丁彩娟)