

# 海水淡化系统相关集成技术

王世明, 周婷\*

(上海海洋大学工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 首先介绍了各种新能源与海水淡化耦合的方式以及研究现状, 其次介绍了海水淡化工艺的相关集成技术和浓盐水处理关键技术, 最后指出了海水淡化集成技术的研究方向。

**关键词:** 海水淡化; 新能源; 耦合方式; 发展方向

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)11-0042-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.11.010

## Review of integrated technologies for seawater desalination

WANG Shi-ming, ZHOU Ting\*

(Engineering College, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** All kinds of seawater desalination technologies driven by new energy and their current situation are described. The progress of the mainstream desalination technologies and the related integration technologies is introduced. The directions of integrated technologies for seawater desalination in the future are proposed in the end.

**Key words:** seawater desalination; new energy; coupling way; development direction

海水淡化是解决淡水短缺的有效方式, 但高成本、高能耗的特性限制了该工艺的推广与运用。对此, 海水淡化工艺可以开展以下工作: 首先是进一步研发海水淡化关键技术, 降低技术成本; 其次结合新能源或者结合工厂的废热与海水淡化耦合, 降低海水淡化的能耗; 最后是进一步利用海水淡化的余液, 变废为宝, 降低对海域环境的污染。

## 1 海水淡化工艺分类

海水淡化, 就是将海水脱盐生产淡水的技术和过程, 主流工艺包括多级闪蒸技术(MSF)、多效蒸馏(MED)、压汽蒸馏(VC)、反渗透技术(RO)、电渗析法(ED)、冷冻法和水合物法, 根据其原理可以归纳为蒸馏法、膜法<sup>[1]</sup>和结晶法3种形式。正向渗透法、生物电化学脱盐技术等是近年来新兴的海水淡化技术。反渗透和低温多效蒸馏是国内海水淡化工程应用最多的方法。通过全球海水淡化市场统计, 不同的海水淡化所占据的市场份额如表1<sup>[2]</sup>所示, 预计2025年, 全球海水淡化总装机容量将达1.2万亿m<sup>3</sup>/a。

表1 不同海水淡化技术所占的市场份额 %

海水淡化技术	份额	海水淡化技术	份额
RO	60.0	ED	3.6
MSF	26.8	混合技术	5.7
MED	8.3	其他技术	0.6

## 2 新能源与海水淡化的集成技术

世界能源危机和水资源匮乏日趋严重, 根据新能源的供能形式和不同海水工艺的特点, 利用绿色能源来进行海水淡化是可持续发展的有效途径。

### 2.1 风能海水淡化

风能海水淡化可分为2类, 一是将风能转化为机械能直接驱动RO和MVC工艺, 另一类是将风能转化为电能驱动MVC和ED等工艺。1982年, 世界上第一座风能海水淡化装置在德国吕根岛投入使用, 装置功率为300 kW, 日生产淡水360 m<sup>3</sup>。西班牙LosMoriscos市利用风能驱动RO系统对苦咸水淡化, 产水规模为200 m<sup>3</sup>/d, 同时Pajara市也利用风能驱动RO系统对海水淡化, 产水规模为56 m<sup>3</sup>/d。较大规模的风能RO海水淡化装置位于挪威Utsira岛, 最大产水量可达1440 m<sup>3</sup>/d。驱动MVC和ED海水淡化可应用于偏远地区及孤立海岛, 1992年, 国家海洋局海洋技术研究所位于山东长岛县小黑山岛开发风能驱动ED工艺系统实验站, 日产淡水24 m<sup>3</sup>, 解决了当地群众饮用苦咸水的问题, 项目运行使用至今, 运行情况良好。2009年, 适用于海上养殖区的新型“风能海水淡化装置”在福建东山县调试成功并投入使用, 由6台3 kW的风力发电机提供动力能源, 每天可以生产10 t的淡水。全球首

收稿日期: 2016-03-28; 修回日期: 2016-09-12

作者简介: 王世明(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为海洋工程的先进设计制造及智能控制, smwang@shou.edu.cn; 周婷(1990-), 女, 硕士生, 主要研究方向为海水淡化装备, 通讯联系人, 847313288@qq.com。

个兆瓦级非并网风电淡化海水示范项目——大丰万吨风能淡化海水示范项目,利用1台30 kW的风机直接给反渗透海水淡化装置供电,于2014年5月成功调试出水,吨水能耗3.6 kWh,出水水质符合国家饮用标准。福建东山风能海水淡化装置,日产淡水10 t,用于淡水养殖和生活饮水。由于风能具有不稳定性,解决方法主要有蓄水池法、电池法、抽水蓄能法等,蓄水池法最为常用。

荷兰 Delft 大学、德国 Enercon 公司和风机设计商 Aerodyn 在风能直接用于海水淡化方面也做出了一系列的研究和成果。由于风能不稳定,RO 技术相比 MVC 和 ED 技术,能够满足各种规模的海水淡化需求,同时可以关闭和启动部分 RO 单元,提高系统的自适应性,来适应风电的波动性和间歇性,故 RO 技术与风能结合在技术和经济上最佳。位于西班牙 Gran Canaria 岛上的一座独立风电海水淡化厂,通过对比研究反渗透法、压缩蒸汽法和电渗析法对风电适应性问题,也证明了上述结论。美国 GE 公司通过对离/并网风力发电驱动海水淡化对比研究,表明离网风能海水淡化成本更低。总之,风能间接驱动 RO 系统的研究主要围绕以下方面:①风能耦合其他新能源或常规能源发电;②提高 RO 系统的模块化程度,根据供电量,选择或关闭淡化模块;③淡化系统控制策略研究,控制风力发电机组的运行及 RO 单元的开启与关闭,最大程度实现系统的自动化。

任典勇等<sup>[3]</sup>从海水淡化成本的角度出发,分析了风能发电与不同规模海水淡化装置的组合参数,为风能海水淡化的经济优化提供理论参考。丛超等<sup>[4]</sup>对风动力蒸汽压缩式海水淡化系统装置进行了工艺流程的理论分析及设计计算。王晓芎<sup>[5]</sup>对风能直接作用风力压缩机,压缩空气驱动气驱增压泵给苦咸水增压驱动 RO 系统运行过程分析研究,发现风力压缩空气式苦咸水淡化系统比风电苦咸水淡化系统具有一定的优势。赵敬恩<sup>[6]</sup>对风能 MSF 海水淡化系统和风能 MED 海水淡化系统进行了热力学焓分析,得到了针对该2套系统的焓损失解析表达,设计了一种直接利用风能驱动 RO 海水淡化系统及其控制方法,并对以上3种系统进行可靠性分析。

## 2.2 太阳能海水淡化

太阳能在海水淡化工艺中的能量利用有2种方式:①将太阳能转化为热能,即太阳能蒸馏海水淡化技术;②将太阳能转化为电能,驱动海水淡化。当前

太阳能海水淡化仍以蒸馏法为主,主要归纳为被动式太阳能蒸馏系统、主动式太阳能蒸馏系统、与常规海水淡化装置结合的太阳能系统等。图1是太阳能与海水淡化技术耦合的形式<sup>[7]</sup>。

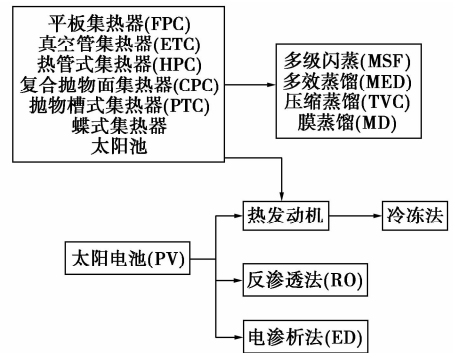


图1 太阳能与海水淡化技术的耦合形式

太阳能蒸馏海水淡化工艺中,太阳能集热技术是研究的重点,故集热器是系统的关键部件。随着光伏发电技术和 RO 技术的提高,20 世纪 80 年代,基于太阳能的 RO 海水淡化系统开始运行。该系统可以离网或并网运行,是远离大陆的孤岛解决淡水匮乏的一种有效方式。

崔夏菁<sup>[8]</sup>根据顺流五效蒸馏/闪蒸太阳能海水淡化装置,对多效蒸馏/闪蒸太阳能海水淡化系统数值模拟,得到系统一年四季的最佳运行参数,为相关运行提供理论依据。陈子乾等<sup>[9]</sup>建立一套低温四效太阳能海水淡化系统实验装置,结合实际太阳辐射值,分析计算出配置集热器、水箱、系统启动及暂停的温度等参数和产水量。解梦秋等<sup>[10]</sup>对吸收式太阳能海水淡化技术进行了研究,总结了其工艺特点、经济可行性以及与其他低品位能源相匹配等问题。关于系统的经济及技术优化研究方面,刘忠等<sup>[11]</sup>设计建造了综合利用太阳能的鼓泡蒸发式海水淡化装置,采用组合式蒸发冷凝器以减小海水热容,同时配备带有冷热水箱的新型太阳集热器以提高海水的集热温度,并建立了系统的数学模型。

## 2.3 核能海水淡化

核能是一种高效、清洁的能源。目前核能的利用包括通过建立核电站发电和利用低温核反应堆供热。其中低温核反应堆技术包括壳式核反应堆和池式核反应堆。核能与海水淡化的耦合形式如表2<sup>[12]</sup>所示。1972年,核能海水淡化首次运用在位于哈萨克斯坦 Aktau 的 MAEK 海水淡化厂,日产淡水120 000 m<sup>3</sup>。日本基于目前主要的3种主流海水淡化技术都设置了研发项目,首创建始于1978年。印

度建有1座混合了多级闪蒸技术和反渗透技术的小型工厂,2002年开始运行。我国自主开发的10 MW (NHR-10)核供热堆,将NHR-10作为HT-MED工艺的热源,日产淡水8 000 m<sup>3</sup>,该工程技术被摩洛哥引入,建为示范项目。

表2 核能与海水淡化的耦合形式

集成形式	模式分类	最佳耦合工艺
电站		RO/TVC工艺
低温核反应堆	壳式堆与海水淡化耦合	HT-MED工艺
	池式堆与海水淡化耦合	LT-MED工艺
热电联产核反应堆	串联式布置模式	蒸馏法
	并联式布置模式	蒸馏法

综上分析比较,核能海水淡化工艺适合于大规模的海水淡化项目,相比其他的主流工艺,RO工艺更具优势,近年来的核能海水淡化项目也都采用RO工艺。始建于2010的红沿河核电海水淡化工程,完全由我国自主设计建造,海水淡化系统采用了超滤预处理和反渗透双膜法(UF-SWRO)工艺,日产淡水10 080 m<sup>3</sup>。福建宁德核电厂海水淡化工程,采用传统预处理和RO工艺,日均产淡水11 000 m<sup>3</sup>。

## 2.4 海洋能海水淡化

### 2.4.1 波浪能海水淡化

目前国内外对波浪能的研究主要集中在波浪能发电方面,对波浪能海水淡化技术的研究比较少。20世纪80年代,美国Delaware大学提出一种典型波浪能RO海水淡化装置,将海水波浪能转换为采集系统的动能,用于驱动活塞泵,活塞泵为海水的浓水侧施加压力,产生高压海水,该装置属于直接利用波浪能的机械能。印度建立了一套产水能力14.4~21.6 m<sup>3</sup>/d的波浪能海水淡化装置,该系统利用波浪能发电驱动RO系统运行,属于波浪能的间接利用。爱尔兰利用波浪能建立了一座集发电和海水淡化一体的装置,通过浮鸭式采集系统,将海水动能和势能转换为液压能,35%用于海水淡化,其余的用于发电。中科院广州能源研究所提出了一种波浪能海水淡化装置,采用振荡浮子吸收波浪能,然后转换为液压泵的液压能,部分液压能用于驱动液压马达发电,部分用于驱动液压马达产生高压海水,用于发电的液压能和用于海水淡化的液压能比例可以按照要求进行控制调节。文献[13]模拟了一个离网型波浪能发电系统,驱动RO海水淡化系统,并且根据描述波浪特性的数据,计算出系统的产水量。总之,波浪能与海水淡化的耦合研究大多集中在波

浪能转换装置与海水淡化系统的结合,缺少进一步的研究。虽然目前没有运行可靠、造水成本低的波浪能海水装置,但是波浪能海水淡化具有极大的潜力,值得深究。

### 2.4.2 潮汐能海水淡化

潮汐能与海水淡化的结合,可以分为直接利用和间接结合。上海理工大学直接利用潮汐能为水泵、排水系统和抽真空提供动力,设计了一种新型的太阳能多效蒸馏海水淡化装置,在一定的试验条件下,淡水产量27 m<sup>3</sup>/h。并对装置中潮汐能利用进行理论分析。广东海洋大学研发出了直接利用潮汐能和波浪能发电于一体的RO装置,利用潮汐驱动水轮机输出轴直接对海水增压,波浪能发电克服了潮汐能的间歇性,提高了系统的转换效率和可靠性。目前潮汐能发电技术已大规模应用,但与海水淡化的耦合度却很低,研究也较少。

### 2.4.3 潮流能海水淡化

潮流能海水淡化也分为直接式和间接式。其中,直接利用潮汐能海水淡化的研究较少。文献[14]提出一种直接利用潮流能海水淡化系统,系统利用潮流能直接驱动低压海水产生高压海水,推导出潮流能驱动海水淡化的数学模型,并对产水量、能耗比等方面进行了仿真。文献[15]提出了潮流能直驱式海水淡化新方案的整体设计以及海洋环境下投放、工作方式的设计,并对设计装置缩比仿真。

### 2.4.4 海洋温差能和盐差能海水淡化

早在1981年,法国学者将热能转换装置和蒸馏装置相耦合,设计出了最早的利用海洋温差能进行海水淡化的装置。目前,国内利用温差能海水淡化还处于试验阶段,天津大学王迅等<sup>[16]</sup>建立了温差能发电系统,采用混合式循环系统,并且对比温海水进入闪蒸器和蒸发器的不同顺序对淡水产量的影响。文献[17]利用虹吸原理,提出了一种基于温差能的新型海水淡化工艺,进行了工艺计算,建立了每小时产水量为5 kg的实验系统。文献[18]介绍了基于海洋温差的新型海水淡化工艺,并且对系统进行了试验模拟,系统每小时淡水产量20 kg。综上分析,温差能海水淡化目前仍处于实验室模拟阶段。

目前,由于盐差能的开发技术难度大,利用海洋盐差能海水淡化尚无人问津。

## 2.5 生物质能海水淡化

生物质能可以通过燃气热机构成生物质能发电系统,发电过程产生的热量可以耦合热法海水淡化工艺,产生的电能可以与RO工艺和ED工艺相耦

合。由于生物质能易于和其他能源耦合,并且利用技术成熟,故利用生物质能制淡前景良好。

## 2.6 地热能和氢能海水淡化

姚福来<sup>[19]</sup>提出利用地热能实现海水的无成本淡化(专利号 CN2143652),装置利用地热能加热海水产生的水蒸汽推动汽轮机发电,从汽轮发电机出来的蒸汽冷凝后得到淡水。赵建康等<sup>[20]</sup>对地热能海水淡化技术的可行性进行分析研究,利用地热能作为低温多效海水淡化方式的热源,就系统的技术可行性、运行费用及初始投资等进行了论证。利用地热能海水淡化前景十分广阔,值得深入地研究。

理论上可以将氢能转化为热能和电能驱动海水淡化工艺,但是氢能本身是一种二次能源,它的制取需要消耗大量的能量,故利用氢能驱动海水淡化尚无实例。但是水解制氢的技术可用于海水淡化装置负载卸荷。

## 2.7 新能源混合海水淡化

由于新能源系统的波动性,故将多种新能源混合驱动海水淡化,来提高系统的稳定性和可靠性。如希腊日产淡水为  $3.12 \text{ m}^3$  的 RO 海水淡化系统依靠风能和光伏供电,其中风能装机容量  $0.9 \text{ kW}$ ,光伏装机容量  $3.96 \text{ kW}$ ;以色列的苦咸水淡化装置日产淡水  $3 \text{ m}^3$ ,其中风电装机为  $0.6 \text{ kW}$ ,光伏发电为  $3.5 \text{ kW}$ 。表3是不同新能源驱动海水淡化所占的比例<sup>[21]</sup>。

表3 不同的新能源驱动海水淡化的所占的比例 %

淡化组合	比例	淡化组合	比例
Solar-Ranking-RO	4	MED-TVC	2
PV-ED	9	MD	16
冷冻法	1	PV-Wind-RO	8
MSF	13	PV-RO	40
MED	7		

综上分析,太阳能、核能和风能与海水淡化的集成密度大,海洋能、地热能等驱动海水淡化的技术尚不完善。

## 3 海水淡化工艺的集成

### 3.1 膜工艺集成技术

超滤(CF)/微滤(UF)/纳滤(NF),超滤膜和微滤膜都是多孔膜,CF主要适用于溶液中大分子的分离与浓缩,微滤主要用于细菌和微粒的去除。新型膜工艺集成技术主要如下:①UF/MF-RO-ED工艺,即UF/MF膜预处理,采用膜污染少抗结垢能力

强的ED膜处理RO膜的浓盐水,不仅可以获得高品质的食盐,而且提高了浓盐水的综合利用水平。

②NF/RO-MCr(一种新型膜接触器操作)工艺,利用MCr处理浓水不仅可以提高净水回收率还可以获取矿化资源,如 $\text{MgSO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 晶体。③FO-RO-PRO工艺,正向渗透FO膜用于RO的预处理工艺,PRO膜用于浓缩废水。2007年,美国和日本的NF膜在水体利用率就已经达到了80%~90%,采用NF-RO工艺,回收率可以达99%。沙特SWCC公司也开发出NF技术用于海水预处理。山东长岛140 t/d纳滤法制备饮用水示范工程于1997年建成,运行成功。

### 3.2 热膜耦合工艺

热法海水淡化工艺,产水水质好、淡化水温度高、设备易结垢、产水效率低等,而膜法海水淡化,产水水质低、依赖预处理、停启方便、产水率高,故两者在某种程度上互补,如将NF-SWRO工艺产生的浓盐水作为MSF系统的补充进料水,可降低传统的MSF工艺系统的结垢性,减少热能的损耗,提高RO工艺的回收率。目前国外已成功地开发了基于NF+SWRO+MSF集成工艺的海水淡化工程,不仅提高了系统的产水率,而且延长膜元件使用寿命。沙特阿拉伯海水淡化公司在相同的操作压力和进料海水下,将NF+SWRO集成技术和SWRO工艺进行了试验对比,集成工艺的回收率为70%,远远高于传统工艺的30%。世界上最大的多级闪蒸海水淡化厂是沙特的RAZZOUR海水淡化厂,同时也是世界上最大的热膜耦合(MSF+RO)工艺海水淡化厂,日均总产淡水量为 $1\,025\,000 \text{ m}^3$ ,其中MSF系统产水为 $769\,000 \text{ m}^3$ 。VC技术与大型的MSF或MED系统联合运行可以进一步提高系统的热回收率。国华(北京)电力研究院有限公司,自主研发日产1.25万t TVC-MED装置。首钢京唐公司可选择的海水淡化运行模式有TVC、MED和MED+TVC 3种,国内首次使用主体蒸发器平行六面体形状,双TVC模式在国外海水淡化设施也使用甚少,实现了热、电、水的联产<sup>[22]</sup>。

### 3.3 海水淡化系统与其他产业的集成

#### 3.3.1 水电联产

水电联产是电厂为海水淡化系统提供热能和电能,其中热能主要是指电厂发电过程中产生的大量高温蒸汽。两者联合,不仅可以提高能源的利用率,而且降低了海水淡化的成本,是建设海水淡化工程的主要模式。文献[23]针对集中反渗透海水淡化

系统耦合发电系统,使海水淡化成本降低11%以上。沙特阿拉伯 JUBAIL 发电厂和 MED 工艺系统耦合,日均产水量为  $800\ 000\ \text{m}^3$ ,是世界上最大的热法水电联产项目;该国的 ACWA 电厂采用 RO 工艺,日产淡水  $624\ 000\ \text{m}^3$ ,是世界上最大的膜法水电联产项目。根据目前的实施情况看,电厂多与 MSF 工艺、LT-MED 工艺、RO 工艺和 CF-RO 工艺耦合。联合建设日产淡水  $90\ \text{m}^3/\text{h}$  的海水淡化系统与 1 个  $1 \times 600\ \text{MW}$  或  $2 \times 300\ \text{MW}$  的电厂,保证一定的水质和电厂运行零排放的条件下,对其技术经济进行分析<sup>[24]</sup>,如表 4。

表 4 4 种不同工艺成本对比

联合工艺系统	总投资/万元	运行维护费用/(万元·a <sup>-1</sup> )	运行成本(系统出力 $24 \times 365$ )/(元·m <sup>-3</sup> )
MSF	4905	338	4.76
LT-MED	3885	243	3.49
RO	2010	302	4.97
CF-RO	2390	304	6.31

通过分析不难发现,热电联产运行成本更低,尤其是低温多效工艺。目前,低温多效蒸馏技术与电厂联产,已经进入了商业化运行阶段,如华能大连电厂与海水淡化工艺相结合。此外国内比较有代表性的项目“九五”攻关示范工程——山东黄岛电厂低温多效海水淡化工程,吨水动力消耗仅为  $1.65\ \text{kWh}$ ;天津北疆发电厂,吨水电耗  $1.45 \sim 1.55\ \text{kWh}$ 。电联产,是滨海电厂的发展方向。

### 3.3.2 化工联产

化工联产可以实现减排,提高综合效益。

淡化余液可以用于新型盐化工,用于制盐、提取溴、钾等盐化工原料。同时淡化余液可以用于高盐水养殖和建设人工死海,开发养殖业和旅游业。此外,浓盐水和热源结合可用于太阳池发电<sup>[25]</sup>等。

### 参考文献

[1] Pangarkar B L, Deshmukh S K, Sapkal V S. Review of membrane distillation process for water purification[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(7):2959-2981.

[2] 杨尚国. 中国海水淡化年鉴(2010)[M]. 北京:海洋出版社, 2012:13.

[3] 任典勇,施慧雄. 海岛风能海水淡化组合体系研究[J]. *海洋学研究*, 2009, (2):111-118.

[4] 丛超,马远洋,王承阳. 风动力蒸汽压缩式海水淡化工艺研究[J]. *节能*, 2013, (9):46-50.

[5] 王晓苒. 风力压缩空气式苦咸水淡化试验研究[D]. 济南:山东大学, 2013.

[6] 赵敬恩. 基于风能利用的海水淡化技术途径研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2013.

[7] 郑宏飞. 太阳能海水淡化原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2013:16, 291.

[8] 崔夏菁. 多效蒸馏/闪蒸太阳能海水淡化系统数值模拟[J]. *节能*, 2013, (2):61-66.

[9] 陈子乾,郑宏飞,马朝臣,等. 低温多效太阳能海水淡化装置最优集热系统的匹配研究[J]. *太阳能学报*, 2008, (6):672-677.

[10] 解梦秋,郑宏飞,叶鸿烈. 吸收式太阳能海水淡化技术[J]. *可再生能源*, 2006, (2):55-56.

[11] 刘忠,曾胜,沈海平,等. 鼓泡蒸发式太阳能海水淡化装置的试验研究[J]. *水处理技术*, 2010, (8):75-79.

[12] 乔世珊,王玉龙. 海水淡化技术及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007, (8):70-75.

[13] Nahidul Hoque Samrat, Norhafizan Ahmad, Imtiaz Ahmed Choudhury. Prospect of stand-alone wave-powered water desalination system[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(1):51-57.

[14] 黄方平,穆永杰,陈俊华,等. 基于潮流能直驱式海水淡化系统的建模与仿真[J]. *海洋工程*, 2014, (2):79-88.

[15] 徐明奇. 潮流能直驱式海水淡化装置技术及仿真研究[D]. 长春,东北师范大学, 2013.

[16] 王迅,谷琳,李赫. 海水温差能发电系统两种循环方式的比较研究[J]. *海洋技术*, 2006, (2):34-38.

[17] 金志江,张素娟,黄国根,等. 基于海洋温差能的海水淡化小试系统的建立及试验研究[J]. *能源工程*, 2008, (4):41-45.

[18] Jin Zhijiang, Wang Hao. Modelling and experiments on ocean thermal energy for desalination[J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 2015, 34(2):103-112.

[19] 姚福来. 地热能海水淡化装置:CN,02143652.5[P]. 2004-03-31.

[20] 赵建康,张勇. 地热能海水淡化技术可行性分析及前景展望[A]. 见:地温资源与地源热泵技术应用论文集(第三集)[C]. 中国地质环境监测院、天津市国土资源局、中国资源综合利用协会地温资源综合利用专业委员会、天津地热勘查开发设计院, 2009:5-6.

[21] 刘锡文,赵河立,王生辉. 海岛地区海水淡化的开发和应用[J]. *净水技术*, 2014, (4):25-29.

[22] 郝彦光,张波,刘雨. 低温多效蒸馏海水淡化工艺的应用[J]. *节能与环保*, 2012, (12):60-61.

[23] Nuez I. Reducing costs of electric power generation through the integration of desalinated water production into insular weak electric systems[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(4):1623-1633.

[24] 伍丽娜,刘菊. 海水淡化技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2015:130-132.

[25] Farahbod F. Experimental study of solar-powered pond as second stage in proposed zero discharge desalination process[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2014, 136(3):3-12. ■