

# 海水淡化全球工程应用现状与发展趋势

王啟林,郝晓地,仇付国

(北京建筑工程学院可持续环境生物技术研发中心 北京 100044)

**摘要** 综述分析指出利用海水淡化开辟新的水源已成为沿海国家解决各自水危机的最终选择,海水淡化技术主要有热处理法和膜处理法两大类,反渗透膜处理法由于在能耗、处理成本上具有明显优势而成为当今世界主流海水淡化技术。根据全球主要应用海水淡化的国家工程实例,重点以反渗透技术为主,介绍海水淡化在全球的工程应用现状及发展趋势。

**关键词** 海水淡化;膜技术;反渗透;处理成本;浓缩液;可再生能源

中图分类号:P747 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2009)S1-0001-05

众所周知,世界上许多国家目前正面临着严重淡水资源短缺问题。随着人口的不断增加,生活标准的日益提高,以及工农业生产活动范围的不断扩大,这一问题更加突显。虽然地球水资源总量非常丰富,但淡水资源总量约占地球水资源总量的 2.8%,而人类可以直接利用的淡水资源仅为地球水资源总量的 0.5% 左右<sup>[1]</sup>。相反,海水占地球水资源总量的 97.2%,几乎是地球淡水资源的 35 倍。可见,仅限于在淡水资源方面开源在水量上局限性很大。因此,向海洋要水,将海水淡化后为人类所用已成为沿海国家一劳永逸地解决淡水资源问题的全球共识。换句话说,海水淡化成为水资源开源方面的终极目标已越来越受到各国有识之士的追捧。随着海水淡化技术的发展,海水淡化在全球范围的工程应用目前正方兴未艾,且其工程规模和应用范围也日益扩大。因此,有必要及时了解目前海水淡化在国内外的应用情况与发展趋势。

海水淡化也称海水脱盐,是一个通过各种除盐技术去除海水中盐分与矿物质并保留水分的工程过程。目前,脱盐技术众多,主要可分为热处理法(多级闪化蒸馏法、多效应蒸馏法、蒸汽压缩蒸馏法)和膜法(反渗透、电渗析)两大类<sup>[2]</sup>。热处理法一般用于高盐度海水的脱盐,但此法通常将发电与脱盐(余热用于蒸发)相结合,如果发电产生的余热与需水量不匹配,就会对脱盐产生消极影响。如果以取用淡水为主要目的,目前膜法中以反渗透为主要代表的

工艺可以选用独立的动力源(如风电、潮汐电、太阳能、核电等),而不必与发电厂匹配、合建。从能量消耗方面考虑,热处理法( $13 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ )要高于反渗透( $5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ )。因此,反渗透技术在单纯的海水淡化方面突显优势。再加上膜质量不断提高而成本逐渐下降,反渗透预处理技术不断进步以及操作经验的日趋成熟等,使反渗透已成为当今世界应用最为广泛的海水淡化技术<sup>[3]</sup>。

笔者根据全球主要应用海水淡化的国家工程实例,重点以反渗透技术为主,介绍海水淡化在全球的工程应用现状及发展趋势。

## 1 中东地区

中东是世界上水资源极度匮乏的地区,为缓解水资源不足的窘境,以海水淡化为主的脱盐技术早在数十年前就在该地区得到了蓬勃的发展。截止到 2007 年 6 月,该地区以海水淡化为主的脱盐能力几乎已经占到全球脱盐总能力的 3/4<sup>[4]</sup>。一份 2005 年的报告指出:目前拟建、在建与已经投入运行的世界上最大的 38 座淡化工厂中,有 35 座位于中东<sup>[4]</sup>。其中,以色列、沙特阿拉伯和阿尔及利亚等国是该地区海水淡化应用的前驱。

### 1.1 以色列

由于水资源的匮乏,以色列计划将于 2010 年底建成总生产能力为 84 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的 5 家反渗透海水淡化厂,分别为 Shomrat 厂(8.4 万  $\text{m}^3/\text{d}$ )、Hadera 厂

(27.4 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ) Palmachim 厂(8.4 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ) Ashdod 厂(12.4 万  $\text{m}^3/\text{d}$ )和 Ashkelon 厂(27.4 万  $\text{m}^3/\text{d}$ )。目前,第一家也是世界上最大的一家位于以色列南海岸的反渗透海水淡化厂——Ashkelon 已于 2005 年 7 月投入运行,该厂处理成本约为 0.53 US \$ / $\text{m}^3$ <sup>[5-6]</sup>。

政策的支持也是海水淡化能在以色列蓬勃发展的原因,以色列环境保护部积极鼓励海水淡化工厂的兴建,并且已将它们视为一项重要的国家发展目标<sup>[6]</sup>。

### 1.2 沙特阿拉伯

沙特阿拉伯已具有多种规模的海水淡化工厂数座,目前正在波斯湾和红海地区投入运行,如生产能力为 80 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的 Saudi Arabia's Shuaiba III 厂、73 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的 Al Jubail II 厂、9 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的 Jabail 厂和 13 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的 Madina-Yanbu 厂等。此外,一家生产能力为 5 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的反渗透海水淡化厂目前正处于建设阶段<sup>[7]</sup>,还有一家生产能力为 15 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的反渗透海水淡化厂亦于 2009 年初投入运行<sup>[8]</sup>。有报道指出,沙特政府已与日本住友公司达成世界最大海水淡化项目建设协议,合同总金额约为 60 亿 US \$,预计将于 2012 年完工,建成后可生产淡化海水 100 万  $\text{m}^3/\text{d}$  相当于沙特淡化海水日产能力的 1/3<sup>[9]</sup>。

### 1.3 阿尔及利亚

随着生活和工业需水量的增加以及大量乡村居民移居到阿尔及尔(阿尔及利亚首都),该市水资源短缺问题日益突出,大多数居民家中一天只有几个小时有自来水供应,严重时多天处于全天短水状态。为了解决阿尔及尔市淡水短缺的窘境,一座非洲最大的海水淡化工厂——Hamm 已于 2008 年 2 月在该市落成。Hamm 是北非第一家公私合营的反渗透海水淡化工厂,由国营阿尔及利亚能源公司(Algerian Energy Company,出资 30 %)和私营 GE 公司(GE Water and Process Technologies,出资 70 %)共同出资兴建,共投资 2.5 亿 US \$,生产能力为 20 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,承担着为该市大约 90 万户居民供水的任务<sup>[3]</sup>。

Hamm 海水淡化工厂位于阿尔及尔港口东部的废弃地之上,具有临近城市配水管网、电网以及输水线路的优势。海水首先通过两根 550 m 进水管进入预处理系统(去除悬浮固体),然后通过双层滤料滤池进入清水池中,随后再通过 5 个微型筒式过滤器和 9 个单元的单级 GE 反渗透装置,最后经再矿化和消毒进入到配水管网中<sup>[3]</sup>。

此外,在阿尔及利亚一个预计耗资 1.149 亿 US \$、生产能力为 10 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的反渗透海水淡化厂也正处于建设阶段。该厂处理工艺由循环溶气浮澄清池和快速重力砂滤池的预处理单元与 8 个反渗透单元

组成。除了除盐外,将硼去除到 0.1 mg/L 水平以下也是反渗透单元的处理目标。该厂是阿尔及利亚能源公司目前正参与建设的海水淡化工厂之一<sup>[3]</sup>。

阿尔及利亚能源公司的目标是到 2011 年要使所有已建或在建海水淡化工厂以及苦咸水脱盐设施总的淡水生产能力达到 230 万  $\text{m}^3/\text{d}$ <sup>[3]</sup>。

然而,目前很多人对像阿尔及利亚这样的非洲国家是否有能力为海水淡化买单提出了质疑。对此,有专家指出,在非洲实际海水淡化工程的成功应用已足以给质疑者肯定的回答<sup>[3]</sup>。水是人类生活的必需品而并不是奢侈品,非洲是一个物产丰富的地区,最近几年工业已经取得了长足发展。因此,它们需要更多的水来创造更多的财富,这些事实足以让海水淡化在非洲具有广阔的应用前景。如尼日利亚某组织已经提出了一项利用淡化海水作为首都阿布贾周边地区淡水资源的建议<sup>[3]</sup>。

### 1.4 其他国家

除上述国家外,海水淡化在阿联酋、约旦、伊朗等国也得到了飞速发展,例如,如阿联酋的一家生产能力为 60 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的 Jebel Ali M 海水淡化工厂将于 2011 年投入运行,约旦也将兴建一座预耗资 3 000 万 US \$,生产能力为 1.4 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的海水淡化工厂;伊朗亦将兴建一座将多效应蒸馏法和反渗透法相结合的海水淡化工厂,该厂的优势是可以对所产生的能量进行优化利用<sup>[4]</sup>。

中东地区被认为是海水淡化的先驱,但随着海水淡化成本的下降以及世界其他地区水资源的逐渐耗竭,海水淡化业亦被世界其他地区作为解决水危机的一种理想选择。

## 2 大洋洲

### 2.1 澳大利亚——珀斯

澳大利亚已于 2006 年 11 月在珀斯市建成了一家生产能力为 14.37 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的反渗透海水淡化工厂。目前该厂是澳大利亚最大的反渗透海水淡化工厂,总共投资 3.87 亿 US \$,每天负责珀斯市 17 % 的供水量。这个海水淡化工程使用可再生能源——风电,成为海水淡化的一大工程亮点;一个 82 MW 的风场每年可为该市电网提供超过 272 GW·h 的电能,其中 185 GW·h 的电能用于该厂海水淡化<sup>[3,10-12]</sup>。海水淡化后的浓缩液通过 40 个排放口(每个出口间隔 5 m)分散排放到距离岸边 470 m 的海洋之中,因此,浓缩液排放对海洋生态环境影响较小<sup>[3,10-12]</sup>。

同时,一家位于珀斯市南部的海水淡化厂也已于 2007 年被提上日程,该厂的预设计生产能力约为 16 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,且具有生产能力加倍的潜力。

2.2 澳大利亚——悉尼

随着气候改变、人口增长和干旱加剧,澳大利亚目前正计划在悉尼市建设一座大规模的反渗透海水淡化工厂,以此来保证悉尼市充足的淡水供应。2005 年 1 月悉尼水务公司对此项工程进行了可行性研究,当时即明确指出,大规模海水淡化将是该市解决淡水资源匮乏问题的有效途径。为此,新南威尔士州政府已将海水淡化纳入悉尼市供水计划。2007 年 2 月,新南威尔士州政府开始在 Kurnell 地区就建设海水淡化工厂问题进行招标;同年 7 月,悉尼水务公司与蓝水合资公司签订了一项 9 亿 US \$ 的合同,委托蓝水公司承担该工程的设计与建设任务。这一海水淡化工厂预设计生产能力为 25 万 m<sup>3</sup>/d;在未来需要的情况下,其生产能力亦可调整至 50 万 m<sup>3</sup>/d。该项工程预计于 2009 年 10 月完工,电能同样采用可再生能源——风电,因此,不存在温室气体 CO<sub>2</sub> 排放问题,社会、环境效益同样显著<sup>[3]</sup>。

在工程设计上,引入的海水首先以较低流速进入工厂,以避免对海洋生物造成不利影响;在工厂内,对海水进行过滤和预处理,以去除颗粒物和悬浮固体。为了达到最优的预处理效果,悉尼水务公司还进行了一项为期 10 个月的预处理中间试验,试验结果显示,预处理可使运行成本大为降低。反渗透工艺由筒式过滤器和一个两级反渗透系统组成。该厂还采用了能量回收装置,以减少运行中的能量消耗和运行成本。悉尼水务公司声称,该厂的净能量消耗(不包括淡水输出泵能耗)将低于 4.2 kW/m<sup>3</sup>。海水淡化后添加石灰、CO<sub>2</sub>、氟,使水质达到澳大利亚饮用水标准(Australian Drinking Water Guidelines)和新南威尔士健康标准(NSW Health)后被直接输送到城市供水系统。海水浓缩液将被均匀排放到海洋中,在排放点 50 ~ 70 m 的范围内,水的盐度和温度将会恢复到海水的正常水平<sup>[3]</sup>。

除珀斯与悉尼外,澳大利亚昆士兰州正在其东南地区兴建一座生产能力为 12.5 万 m<sup>3</sup>/d 的反渗透海水淡化工厂,该厂于 2009 年 1 月投入实际运行<sup>[3,12]</sup>。

3 美 洲

3.1 美国——加利福尼亚州

在美国,严重的干旱使该国许多州面临淡水资源短缺的困境,如,北达科他州、阿拉巴马州、佐治亚州、南卡罗莱纳州、得克萨斯州、佛罗里达州和加利福尼亚州等。为了解决淡水资源不足的问题,许多州的政府已经将目光转向了海水淡化技术,加利福尼亚州便是该技术成功应用的范例之一。

目前,有 17 座规模各异的反渗透海水淡化厂正在加利福尼亚兴建(详见表 1 所示)<sup>[13]</sup>,其中,最大的一座预计生产能力可高达 30.3 万 m<sup>3</sup>/d,这也将是迄今为止美国最大的反渗透海水淡化工厂。但由于目前加利福尼亚许多反渗透海水淡化工厂规模较小(<2000 m<sup>3</sup>/d),所以,目前该州淡水供应中只有不到 1%来源于海水淡化。然而,到 2015 年时,这一数字预计会变为 10%。显然,这是由于目前加州淡水资源严重短缺形势对此技术应用推动的结果<sup>[3]</sup>。

表 1 加利福尼亚州正建反渗透海水淡化厂<sup>[13]</sup>

| 反渗透海水淡化工厂<br>(项目地)    | 生产能力/<br>(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 竣工<br>年份 | 成本/<br>(US \$·m <sup>-3</sup> ) |
|-----------------------|---------------------------------------------|----------|---------------------------------|
| Huntington Beach      | 200 000                                     | 2010     | 0.70 ~ 0.75                     |
| Carlsbad              | 200 000                                     | 2010     | 0.70 ~ 0.75                     |
| Playa Del Rey         | 45 000                                      | 2015     | 0.85 ~ 1.0                      |
| El Segundo            | 76 000                                      | 2015     | 0.80 ~ 0.90                     |
| San Onofre            | 95 000                                      | 2015     | 0.90 ~ 1.1                      |
| Dana Point            | 100 000                                     | 2013     | 0.85 ~ 0.95                     |
| Long Beach            | 34 000                                      | 2015     | 0.75 ~ 0.95                     |
| Bay Aera Regional     | 76 000 ~ 303 000                            | 2011     | 0.85 ~ 1.20                     |
| LEAD                  | 5 700                                       | 2010     | 0.95 ~ 1.15                     |
| Sand 市                | 1 000                                       | 2010     | 1.10 ~ 1.30                     |
| San Rafael            | 38 000 ~ 57 000                             | 2011     | 0.80 ~ 0.90                     |
| Cambria               | 1 500                                       | 2012     | 1.10 ~ 1.30                     |
| Moss Landing          | 45 000                                      | 2012     | 1.10 ~ 1.20                     |
| Santa Cruz            | 10 000 ~ 17 000                             | 2010     | 0.85 ~ 1.00                     |
| Monterey Bay Regional | 76 000 ~ 95 000                             | 2012     | 0.90 ~ 0.95                     |
| San Luis Obispo       | 7 100                                       | 2015     | 1.00 ~ 1.20                     |
| Marina 沿海水域           | 5 000                                       | 2012     | 0.90 ~ 1.10                     |

反渗透海水淡化厂在加利福尼亚的兴建是非常有必要的,因为该州的水源主要来自旧金山湾/三角洲或科罗拉多河,且水量分配受到严格管理。最近几年,科罗拉多州持续干旱,河中水源不足,从旧金山湾/三角洲中取水亦造成鱼类等水生动物、植物死亡现象,故,从旧金山湾/三角洲取水也被禁止。因此,为了满足当地居民对该州水资源的需求,该州必须另辟蹊径,这就使得反渗透海水淡化成为一种理想的选择<sup>[3]</sup>。

3.2 美国其他州

因为美国人口的 50% 都居住在沿海地区,因此,海水淡化对这些沿海地区的州来说将愈来愈具有吸引力。佐治亚州、北卡罗来纳州和北马萨诸塞州目前也正在考虑海水淡化的可能性,其中,北马萨诸塞州也是唯一一个具有官方海水淡化政策的州。即使是那些淡水资源相对丰富的州,目前亦对海水淡化表现出了浓厚兴趣<sup>[3]</sup>。

3.3 其他国家

除美国外,墨西哥也在 Baja California Sur 地区兴建了一个利用太阳能供能的反渗透海水淡化工厂。该厂充分利用该地区海岸线广阔的优势兴建,为解

决该地区水资源短缺问题作出了巨大贡献<sup>[14]</sup>。

同时,在加勒比海地区,海水淡化厂亦屡见不鲜<sup>[3]</sup>。

4 欧 洲

4.1 西班牙

在欧洲,西班牙是一个淡水资源比较匮乏的国家,水资源分布极不均匀。每逢夏季,巴利阿里群岛、加那利群岛和地中海地区都会由于旅游业和农业的缘故而面临水资源短缺的境况。为此,西班牙政府积极采用海水淡化方式来弥补其淡水资源的不足。据统计,目前西班牙海水淡化工厂的总生产能力已达到 37.6 万 m<sup>3</sup>/d<sup>[15]</sup>。

西班牙早在 40 年前就建造了欧洲第一座海水淡化工厂,从此,将欧洲带入了海水淡化兴起时代。西班牙海水淡化产业从那时起得到了蓬勃发展,如,生产能力为 4 万 m<sup>3</sup>/d 的 Emaya 反渗透海水淡化工厂、生产能力为 12 万 m<sup>3</sup>/d 的 Carboneras 反渗透海水淡化工厂、生产能力为 6.85 万 m<sup>3</sup>/d 的 Bahia de Palma 反渗透海水淡化工厂和生产能力为 5.07 万 m<sup>3</sup>/d 的 Alicante 反渗透海水淡化工厂等相继落成<sup>[16]</sup>。其中,Carboneras 反渗透海水淡化厂是迄今为止欧洲最大的反渗透海水淡化厂,其处理成本约合 0.60 US \$/m<sup>3</sup><sup>[17]</sup>。此外,目前还有一家反渗透海水淡化厂正在 Guevas del Almanzora 地区兴建,预计将为该地区提供 6 万 m<sup>3</sup>/d 的水量<sup>[15]</sup>。

4.2 其他国家

德国、意大利、英国、法国等国也面临着淡水资源不足的境况,在这些国家,海水淡化也得到了一定的发展<sup>[18]</sup>。如,英国政府已经同意在泰晤士河边兴建海水淡化工厂,该厂将耗资 2 亿 £(约合 3.76 亿 US \$),为伦敦市供应 14 万 m<sup>3</sup>/d 的淡化海水<sup>[3]</sup>。

5 东 亚

5.1 中国

我国是世界上严重缺水的国家之一,淡水资源日益短缺乃至水危机已成为制约我国经济社会可持续发展的重大瓶颈之一,并已严重影响到民众的正常生活和经济社会的发展。为此,国家提出“开源节流并举,节约优先”的节水方针,积极支持海水利用产业,并于 2005 年 8 月颁布实施了《海水利用专项规划》。该规划指出,我国在 2010 年、2020 年建成和在建的海水淡化工程的生产能力将分别达到 100 万 m<sup>3</sup>/d 和 280 万 m<sup>3</sup>/d。目前,全国在建、待建的海水淡化工程规模已达到 195.8 万 m<sup>3</sup>/d(表 2)<sup>[19]</sup>。

表 2 我国在建、待建的海水淡化工程分布<sup>[19]</sup>

| 海水淡化工程<br>(项目地) | 规模/<br>(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 海水淡化工程<br>(项目地)  | 规模/<br>(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|-------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------|
| 唐山曹妃甸港口         | 100 000                                   | 大连实德             | 12 000                                    |
| 唐山三友集团          | 10 000                                    | 秦皇岛、国华沧东         | 共 340 000                                 |
| 天津大港新泉淡化厂       | 150 000                                   | 葫芦岛              | 50 000                                    |
| 天津北疆电厂          | 200 000                                   | 辽宁营口核能           | 80 000                                    |
| 天津开发区           | 160 000                                   | 大连核能             | 100 000                                   |
| 深圳大鹏半岛、蛇口       | 50 000                                    | 山东烟台核能           | 160 000                                   |
| 山东鲁北化工厂         | 20 000                                    | 山东威海第二热电厂        | 10 000                                    |
| 山东青岛黄岛电厂        | 20 000                                    | 山东青岛黄岛电厂         | 50 000                                    |
| 山东青岛碱业公司        | 10 000                                    | 舟山嵊山县、<br>浙江大洋山镇 | 2 × 1 000                                 |
| 山东青岛百发<br>海水淡化厂 | 100 000                                   | 浙江舟山岱山县          | 3 000                                     |
| 五龙、枸杞、黄龙        | 3 × 1 000                                 | 浙江洞头             | 33 000                                    |
| 浙江舟山长涂西鹤度       | 5 000                                     | 浙江乐清电厂           | 30 000                                    |
| 浙江象山县           | 100 000                                   | 浙江温岭核能<br>海水淡化   | 100 000                                   |
| 大连瓦房店           | 25 000                                    | 厦门市大嶝岛           | 5 000                                     |
| 大连北良渚           | 30 000                                    |                  |                                           |

截至 2006 年底,我国已建成海水淡化装置 43 套,淡水产量为 15.08 万 m<sup>3</sup>/d。其中引进国外技术的有 9 套,产水量为 10.57 万 m<sup>3</sup>/d,占 70.11%;应用国产技术的有 34 套,产水量为 4.5 万 m<sup>3</sup>/d,占 29.89%。国内先后自主设计、建造了 2 × 2 500 m<sup>3</sup>/d 反渗透和 3 000 m<sup>3</sup>/d 低温多效海水淡化工程,自主研发的淡化设备造价比进口的降低 30% ~ 50%,吨水成本接近国际先进水平<sup>[19]</sup>。

2007 年,我国首台单体容量最大、技术含量最高、单机占地面积最小的海水淡化设备——1 万 m<sup>3</sup>/d 反渗透海水淡化装置在青岛经济技术开发区黄岛发电厂正式投入运行,其所产淡化水水质符合并超过国家饮用纯净水水质标准。这是该厂继 3 000 m<sup>3</sup>/d 低温多效和 3 000 m<sup>3</sup>/d 反渗透海水淡化设备运行后第三台现代化海水淡化设备。至此,该厂淡化海水生产能力将达到 1.6 万 m<sup>3</sup>/d,可完全满足发电用水和职工生活饮用水的需求。

2009 年上半年,首钢京唐公司海水淡化设备也已吊装到位,这标志着首钢京唐公司海水淡化工程项目(热处理法)进入新阶段。海水淡化是首钢京唐公司解决缺水问题、实现水资源可持续利用的重要方面,其淡化海水接近于纯净水,可满足炼钢、炼铁、轧钢等生产使用高品质冷却水的需求,可节约淡水 2000 万 t/a。

5.2 日本

日本某些地区也时常面临淡水资源不足的处境,因此,海水淡化在日本也如雨后春笋般得到了发展。在过去的 30 多年里,日本已建成海水淡化工厂 2000 多家,所有海水淡化工厂的总生产能力为 109

万  $\text{m}^3/\text{d}$  ,大约占世界总海水淡化能力的 1/7 ,其中 ,反渗透海水淡化占到日本的海水淡化总能力的 90% 以上。近年来 ,日本平均每年以新建总生产能力为 5 万 ~ 6 万  $\text{m}^3/\text{d}$  海水淡化工厂的速度发展反渗透海水淡化技术<sup>[20]</sup>。其中 ,于 1996 ~ 1997 年间建成的生产能力为 4 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的反渗透海水淡化厂被誉为当时最大的海水淡化工厂<sup>[20]</sup> ,而于 2005 年建成的生产能力为 5 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的反渗透海水淡化厂则是迄今为止日本最大的海水淡化工厂<sup>[21]</sup>。这些厂的兴建为解决日本部分地区淡水资源短缺问题做出了积极贡献。

5.3 新加坡

新加坡也对反渗透海水淡化表现出了浓厚的兴趣 ,新加坡已于 2005 年 9 月建成该国第一座反渗透海水淡化工厂。该厂总投资 2 亿 SG \$( 约合 1.47 亿 US \$ ) ,生产能力为 11.3 万  $\text{m}^3/\text{d}$  ,可以满足该国 10% 的用水需求。该厂的建成也标志着该国第 4 “水龙头”正式开启<sup>[22]</sup>。此外 ,由西拉雅能源公司投资 2000 万 SG \$( 约合 1470 万 US \$ )建成的生产能力为 1 万  $\text{m}^3/\text{d}$  反渗透海水淡化工厂也已于 2009 年在新加坡正式启用。

6 发展前景

海水淡化在全球的广泛应用得益于反渗透膜成本的降低与技术的发展。目前 ,反渗透系统正变得越来越小 ,而膜生产淡水能力不断提高。据统计 ,现在同样面积膜的生产能力为 20 年前的 20 倍 ,依此推断 ,10 年之后 ,此数字至少将会变为 30 倍<sup>[3]</sup>。目前 ,已经具有可供海船使用的便携式反渗透系统。专家预测 ,可装入电脑包的反渗透系统在 5 年之后可能将会成为现实<sup>[3]</sup>。

与此同时 ,将微碳纳米管( Tiny Carbon Nanotube )嵌入到膜中的膜系统也正处于研发阶段 ,首个样品每  $\text{ft}^2$  ( 约 0.093  $\text{m}^2$  )的生产能力为普通膜的 2 倍。荷兰代尔夫特理工大学目前正在研发一种利用可再生能源——风能为反渗透系统提供能量的装置 ,此系统目前正处于试验阶段 ,风能装置必将成为降低反渗透淡化成本的助力器<sup>[3]</sup>。

专家指出 ,目前反渗透海水淡化成本大约为 0.5 ~ 1.2 US \$ / $\text{m}^3$  ( 约合人民币为 3.5 ~ 8.4 元/ $\text{m}^3$  )。随着反渗透膜与技术的不断发展 ,相信淡化成本将会变得越来越低。GE 公司目前承接的一项反渗透工程正着力使淡化成本向 0.1 US \$ / $\text{m}^3$  方向努力<sup>[3]</sup>。如果能将反渗透海水淡化与上游的风力发电以及下游的浓缩液( 提取矿物质或晒盐 )利用相结合 ,完全可以形成一种清洁生产工艺( 或生态经济 )

链 ,不仅可以使海水淡化的综合成本大为降低 ,同时也做到了产业链的零污染排放 ,使社会、环境、经济利益三者和谐统一<sup>[23-25]</sup>。

卡塔尔科技园( Qatar Science and Technology Park )和 Texas A & M 大学目前亦正共同投资( 40 万 US \$ )研究一种“零液体排放”( Zero Liquid Discharge )技术。该技术通过向淡化水副产物——盐水浓缩液中添加石灰和铝的混合物达到去除盐水浓缩液中的盐分 ,进而避免了盐水浓缩液排回大海可能对海洋环境造成的不利影响。目前 ,Texas A & M 大学正对该技术进行小试 ,以确定这项技术的有效性以及对能量的需求和生产成本等。在可持续发展成为当今时代主题的背景下 ,“零液体排放”技术的产生将对海水淡化的推广应用起到推波助澜的作用<sup>[4]</sup>。

7 结 语

全球水资源的日益匮乏已成为制约社会发展的瓶颈之一。海水淡化是实现水资源开源增量、解决水危机的一种终极选择。世界各国缺水地区目前正积极采取这样的途径来弥补各自不足的水资源 ,工程应用数量与规模不断攀升。

由于反渗透海水淡化需要消耗电能 ,所以 ,煤电等不可再生能源的大量使用不仅加剧这些能源的匮乏速度 ,还会导致温室气体—— $\text{CO}_2$  的大量排放。因此 ,反渗透海水淡化应因地制宜地选择那些可再生能源 ,如 ,风能、潮汐能、太阳能等。

膜技术近几年发展异常迅速 ,促使反渗透海水淡化成本相应降低。随着膜技术的进一步发展 ,海水淡化成本势必变得越来越低。可以预见 ,随着非常规水资源( 如 ,远距离调水 )成本的不断攀升 ,必将使自来水生产成本超过海水淡化成本。日益攀升的城市水价必将推动海水淡化产业的蓬勃兴起。

参考文献 :

[ 1 ] KHAWAJI A D , KUTUBKHANAH I K , WIE J M. Advances in seawater desalination technologies[ J ]. Desalination , 2008 , 221( 1-3 ) : 47-69.  
[ 2 ] LAMEI A , van der ZAAG P , VON MUNCH E. Impact of solar energy cost on water production cost of seawater desalination plants in Egypt[ J ]. Energy Policy , 2008 , 36( 5 ) : 1748-1756.  
[ 3 ] STEDMAN L. Desalination delivers resource relief[ J ]. Water 21 , 2008( 12 ) : 16-22.  
[ 4 ] LIS S. Desal developments in the Middle East[ J ]. Water 21 , 2008( 20 ) : 38-39.  
[ 5 ] SAUVET-GOICHON B. Ashkelon desalination plant-A successful challenge[ J ]. Desalination , 2007 , 203( 1-3 ) : 75-81.

( 下转第 13 页 )

标准[J]. 中国环境监测 2002, 18(5): 47-49.

[6] 廖国华, 钟晓, 庞增栓. 红枫湖、百花湖水污染趋势分析及控制对策[J]. 地球与环境 2004, 32(3-4): 49-52.

[7] 吴沿友, 李萍萍, 王宝利. 红枫湖百花湖水水质及浮游植物的变化[J]. 农业环境科学学报 2004, 23(4): 745-747.

[8] 李旗. 红枫湖、百花湖近年来富营养化状况分析[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版 2001, 30(5): 98-102.

[9] 姚俊杰, 沈昆根, 安苗. 红枫湖、百花湖水体的生态修复[J]. 贵州科学 2007, 23(5): 144-149.

[10] 黎慧娟, 倪乐意. 浮游绿藻对沉水植物苦草的抑制作用[J]. 湖泊科学 2007, 19(2): 111-117.

[11] 李杰君. 洱海富营养化探析及防治建议[J]. 湖泊科学, 2001, 13(2): 187-192.

[12] 李娟, 龙健, 李阳兵. 贵州高原喀斯特山区土壤环境问题与对策[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版 2007, 25(4): 12-16.

[13] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清英. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境出版社, 1990 373-389.

[14] 庞磊, 庞增栓. 红枫湖、百花湖水体污染事件调查[J]. 环保科技 2007, 13(3): 44-48.

[15] 李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 等. 岩溶生态系统脆弱性剖析[J]. 热带地理 2006, 26(4): 303-307.

[16] 贾亚男, 袁道先. 土地利用变化对水城盆地岩溶水水质的影响[J]. 地理学报 2003, 58(6): 831-838.

[17] 葛滢, 王晓月, 常杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. 环境科学学报 1999, 19(6): 690-692.

[18] DANIELA B. Assessment of macro and microelement accumulation capability of two aquatic plants[J]. Environmental Pollution, 2004, 130: 149-156.

[19] MADSEM T V, CEDERGREEN N. Sources of nutrients to rooted submerged macrophytes growing in a nutrient-rich stream[J]. Freshwater Biology, 2002, 47: 283-291.

[20] CROSSLEY M N, DENNISON W C, WILLIAMS R R, et al. The interaction of water flow and nutrients on aquatic plant growth[J]. Hydrobiologia, 2002, 489: 63-70.

[21] HE Tian-rong, FENG Xin-bin, GUO Yan-na. The impact of eutrophication on the biogeochemical cycling of mercury species in a reservoir: a case study from Hongfeng Reservoir, Guizhou, China[J]. Environmental Pollution 2008, 154: 65-67.

(收稿日期 2008-12-08 编辑 徐娟)

---

(上接第5页)

[6] SAFRAI I, ZASK A. Reverse osmosis desalination plants-marine environmental regulator point of view[J]. Desalination, 2008, 220(1-3): 72-84.

[7] KHAWAJI A D, KUTUBKHANAH I K, WIE J M. A 13.3 MGD seawater RO desalination plant for Yanbu Industrial City[J]. Desalination, 2007, 203(1-3): 176-188.

[8] SADAYUKI S. Toray supplies RO membranes for desalination plant in Saudi Arabia[J]. Membrane Technology, 2008(2): 1.

[9] 沙特将建世界最大海水淡化项目[EB/OL]. [2008-07-07]. [http://www.sdmu.com.cn/news\\_view.asp?newsid=410](http://www.sdmu.com.cn/news_view.asp?newsid=410).

[10] CRISP G. Perth seawater desalination plant-A sustainable solution[C]//The Proceedings of the 2nd IWA-ASPIRE Conference and Exhibition. IWA Australia: Perth, 2007.

[11] BONNELYE V, MERCER G, DANIEL L, et al. Perth reverse osmosis facility: an environmentally integrated desalination plant[C]//The Proceedings of the 2nd IWA-ASPIRE Conference and Exhibition. IWA Australia: Perth, 2007.

[12] MCCANN B. Perth marks Australia's progress to desalination[J]. Water 21, 2007(12): 17-19.

[13] VOUTCHKOV N. California turns to the ocean[J]. Water 21, 2007(12): 22-24.

[14] BERMUDEZ-CONTRERAS A, THOMSON M, INFELD D G. Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico[J]. Desalination, 2008, 220(1-3): 431-440.

[15] MUNOZ I, FERNANDEZ-ALBA A R. Reducing the environmental impacts of reverse osmosis desalination by using brackish groundwater resources[J]. Water Res, 2008, 42(3): 801-811.

[16] Reverse osmosis desalination plants reference list-major project[EB/OL]. [2007-12-09]. [www.outokumpu.com/36039.epibrw](http://www.outokumpu.com/36039.epibrw).

[17] Wind power purifies salt water[EB/OL]. [2006-04-13]. [www.unitedworld-usa.com/reports/spain/carboneras.asp](http://www.unitedworld-usa.com/reports/spain/carboneras.asp).

[18] FRITZMANN C, LOWENBERG J, WINTGENS T, et al. State-of-the-art of reverse osmosis desalination[J]. Desalination, 2007, 216(1-3): 1-76.

[19] 阮国岭, 冯厚军. 国内外海水淡化技术的进展[J]. 中国给水排水, 2008, 24(20): 86-90.

[20] UEMURA T, KONDOU Y. Membrane technology progress in Japan[J]. Water 21, 2003(16): 37-39.

[21] ATKINSON S. Japan's largest sea-water desalination plant uses Nitto Denko membranes[J]. Membrane Technology, 2005(4): 10-11.

[22] TEO Y Y. Fourth national tap flows[J]. Waternet, 2005(20): 3-3.

[23] 郝晓地, 李会海. 海水淡化+风能发电+盐业化工: 三位一体的清洁生产技术[J]. 节能与环保, 2006(10): 25-28.

[24] 郝晓地, 胡沅胜, 李会海. 北京水资源战略: 三位一体的海水淡化生态技术[J]. 水资源保护 2008, 24(6): 104-107.

[25] 郝晓地. 可持续污水、废物处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

(收稿日期 2008-12-17 编辑 徐娟)