

世界水资源短缺：节约用水和海水淡化

Worldwide water shortage: Water conservation and seawater desalination

■文/郭久亦 翻译/于冰

水资源压力

除了全球人口过剩问题，世界经济论坛在2015年1月宣布基于对社会影响破坏的量化，水资源短缺问题——水危机是全球第一大风险。联合国界定当一个地区的人均水资源量跌破1700立方米/人为用水紧张，当人均水资源量低于1000立方米/人为缺水。据估计，全世界10%的人口没有安全的饮用水。随着世界人口快速增长，这一数字将增加。全球淡水需求量每年增加6400亿立方米。联合国教科文组织报告称，到2025年全球淡水紧缺量将上升到20000亿立方米。联合国警告说，如果不加以改进，到2030年我们只拥有所需水的60%。

这些所缺的水将从哪里来？更糟的灾区在亚洲、中东和北非的半干旱地区。国际原子能机构研究表明有23亿人（世界人口的1/3）生活在用水紧张的地区，其中17亿人每年可用的水不足1000立方米。到2025年，这一数字将上升至35亿。

如此缺水极其令人担忧，因为这对世界经济可持续发展的可持续性有很大的影响。由于水对所有行业（农业、矿业、能源生产等）以及人类福祉来说是必不可少的。

中国水资源短缺的根本原因在于，尽管中国拥有世界21%的人口，却只有7%的世界淡水供应。中国80%的降水在南方出现，只有20%的降水发生在大部分沙漠地区的北方，北方特别干燥。例如，北京的年平均降雨量只有57厘米（每月4.8厘米）。中国淡水需求供不应求，消耗水平已经比2012年高出70%。据预测，中国到2020年需水量将达到6700亿立方米，而水资源随着时间却越来越少。

据媒体报道，南水北调中线工程以前，北京的年人均水量只有100立方米，是世界平均水平的1.25%。由于从南方调水，这一数字将上升到150立方米/年（411升/日）。北京平均居民家庭用水量为86升/日，

相比而言英国和美国分别为150升/日和560升/日。

然而，伴随缺水的是全国范围内的水污染问题。2014年中国环境状况公报显示，中国近60%的地下水受到污染，35%的水因水质差不适合用于工业、农业或人类消费。然而，一部分受污染水还是被使用了。

节约用水

我们应该集中精力更有效地利用现有的资源，包括：

- *更好的水资源可持续管理。
- *污染治理。
- *水回收。
- *减少农业灌溉渗漏。
- *收集屋顶和街道雨水。

*循环利用城市生活废水。这是未来必须做的事。许多国家正在针对这一问题进行尝试，排名前5位的污水处理厂有：

—美国芝加哥大都会区斯蒂克尼(Stickney)污水处理厂处理能力545万立方米/日，服务240万人。年度预算4.5亿美元，成本为0.22美元/立方米，是海水淡化成本的1/3—1/2（见海水淡化部分）；

- 美国波士顿水厂480万立方米/日；
- 美国底特律水厂348万立方米/日；
- 中国上海水厂200万立方米/日；

—墨西哥阿托托尼尔科(Atotonilco)水厂200万立方米/日。

- *提高水价。
- *升级雨水系统。

海水淡化

由于全球冰川正在快速融化，过度抽取地下水导

致含水层枯竭和河流污染,人类已经没有很多选择。

海水淡化是解决居民用水问题的一个很好的方案,但现在也广泛用于农业和工业用途。然而,海水淡化耗能多(主要是电力),是一项昂贵的业务。不论是资本成本还是运行成本,海水淡化能耗大约为3-10千瓦时/立方米。但是,成本也取决于例如运送海水的距离和输送淡水到城市的距离等一些参数。例如在以色列,海水淡化耗电3.5千瓦时,包括泵海水到工厂耗电1.3千瓦时和反渗透海水淡化工序耗电2.2千瓦时。目前电力价格为0.12美元/千瓦时,3.5千瓦时电力折算为0.42美元/立方米。它的费用大约是雨水和废水处理费用的2-3倍。多级闪蒸的费用甚至更高。

海水淡化技术

海水淡化基本上有2种方法。

*反渗透(Reverse Osmosis, RO)

海水通过电泵施加高压克服阻力通过半透膜,淡水透过膜,而盐留下来。该工艺电耗高,吨水耗电大约3-8千瓦时。2011年这种方法占全球产能的60%。

把海水压力升高70公斤/每平方厘米以上比煮沸海水能耗低,但仍然是昂贵的。

比标准反渗透RO工艺更有效的新技术会陆续上马,从而减少能源成本:

1) 采用石墨膜等纳米技术会节省成本,提高效率。

2) 使用碳纳米管的渗透膜。纳米管嘴的电压排斥带正电的盐离子。不带电的水分子以微小摩擦成为漏网之鱼通过,降低了泵压。

3) 水分子通过水通道蛋白质(高效运输水)制成的管道。正电荷排斥每个通道中心附近的盐分子,截留盐。

*多闪蒸(Multi-Flash Distillation, MFD)和高效蒸馏(Multi-Effect distillation, MED)

这是需要大量能量的强力方法。这是简单的蒸馏

方法,海水被加热和蒸馏。它能够利用电厂余热。此过程需要电力10千瓦时/立方米。

据世界上最重要的海水淡化权威机构——国际脱盐协会(International Desalination Association, IDA)得知:2013年世界总共有超过1.7万家海水淡化厂。2013年全球产能是8000多万立方米/日。到目前为止,供水超过6650万立方米/日。大部分水用于农业、发电厂、炼油、石油和天然气、煤炭开采和金属等行业。有超过3亿人日常生活全部或部分依靠海水淡化。

主要国家海水淡化能力见表1,合计3396万立方米/日。

世界上新的大型海水淡化项目

海水淡化厂已经在超过120个国家运行,包括沙特阿拉伯、阿曼、阿联酋、西班牙、塞浦路斯、马耳他、直布罗陀、佛得角、葡萄牙、希腊、意大利、印度、中国、日本和澳大利亚。

许多水厂即将运行。各国最大水厂情况如下:

*沙特阿拉伯

海尔哈纳(Ras Al Khair)水厂采用RO反渗透和MSF多级闪蒸的混合技术,处理能力102.5万立方米/日,建设成本高达72亿美元。红海附近的拉比格(Rabigh)也在规划建立处理能力60万立方米/日的水厂。

*阿拉伯联合酋长国

目前水厂处理能力460万立方米/日,建设费用27亿美元,积极利用太阳能。

*澳大利亚

由于长期干旱,6家水厂采用RO反渗透技术、利用风能等可再生能源,总产量为145万立方米/日。总体而言,算上小厂,海水淡化能力大约是220万立方米/日。

*西班牙

西班牙在海水淡化方面有40多年的历史,并积极

表1 主要国家海水淡化能力(立方米/日)

国家	沙特阿拉伯	阿联酋	西班牙	科威特	阿尔及利亚
海水淡化能力	9170391	8381299	3781314	2586761	2364055
国家	澳大利亚	卡塔尔	以色列	中国	利比亚
海水淡化能力	1823154	1780708	1532723	1494198	1048424

向世界各地出售专业知识。它有900家小型海水淡化厂,产能150万立方米/日。目前规划利用可再生能源产能170万立方米/日的水厂项目。

***中国**

目前产量为75万立方米/日。现在正建设一家利用RO反渗透技术产能300万立方米/日的水厂,2020年为北京供水。建设工厂将花费11亿美元,输送到北京的管道将额外花费16亿美元。

***以色列**

索莱克(Sorek)水厂建于2013年,生产能力62.7万立方米/日。到2016年,其供水的50%将来自海水淡化。它采用高效改进RO反渗透膜技术,因此节省能源。建设费用4亿美元。

***阿尔及利亚**

拥有一家利用RO反渗透技术产能50万立方米/日的大型海水淡化厂。

***美国**

加利福尼亚州圣地亚哥市卡尔斯班(Carlsbad)花费10亿美元在2016年要建成采用RO反渗透技术产能19万立方米/日的水厂。

中国的海水淡化

中国约400个城市面临着严重的缺水问题。根据国家海洋局数据,2014年中国有112家海水淡化厂,生产能力93万立方米/日。政府的目标是到2020年海水淡化能力翻两番,达到360万立方米/日。

在中国,火电/核电厂、钢铁和金属生产工厂等主要工业部门和工业园区使用了超过90%的淡化水。

在山东省青岛市,采用RO反渗透技术产能10万立方米/日的海水淡化厂于2013年开始运行,由西班牙阿本戈(Abengoa)集团建设。另一个项目是大亚湾附近生产能力33万立方米/日的水厂。

在河北省渤海湾的曹妃甸,挪威阿科凌(Aqualyng)公司于2011年10月建成了5万立方米/日的水厂,2012年二期工程生产能力增加了一倍。香港上市的北控水务集团与阿科凌正在曹妃甸投资70亿人民币(10.6亿美元)建设生产能力100万立方米/日的RO反渗透水厂,到2019年通过270公里的管道给1/3的北京居民供水。为供水北京,规划建设300万立方米/日的水厂。管道作为项目的重要组成部分,将耗资约100亿人民币(15亿美元),淡化水供应价格为8元

人民币(1.22美元)/立方米。

2013年3月,国家发展和改革委员会公布了新的海水淡化规划,包括深圳、浙江舟山、浙江鹿西乡(岛)、天津滨海新区、河北沧州渤海新区等城市,和一些工业园区和企业入选试点名单。目标是到2015年生产能力达到220万立方米/日,是2011年水平的三倍以上。根据规划,到2015年超过一半的淡水被引到岛屿,沿海企业15%以上的用水来自海水淡化。该规划投资成本大约210亿元人民币(32亿美元)。

天津一家30万立方米/日的海水淡化厂正在建设中,它将成为世界上第一个零液体排放(zero-liquid discharge, ZLD)的水厂,2017年供水石化厂。

核能海水淡化

核能海水淡化是快速增长的资源,在整个21世纪将持续具有很高的潜力。它的优点是不会排放温室气体(Green House Gases, GHG)。而且与其他燃料特别是煤炭相比,生产水的价格非常有竞争力。

可购性问题都可以归结为能源的成本。由于燃煤电厂产生过多的温室气体排放,不受人们欢迎。中国正在转向核电站,目前针对钍基熔盐(Thorium molten salt)反应堆已经开展很多研究,钍基反应堆比钚反应堆更安全和经济。

基于商业的大规模采用核能淡化海水将主要取决于经济因素。其成本是70-90美分/立方米,与同一地区的化石燃料发电厂大致相同。

表2列出了海水淡化厂联合不同类型电厂的成本情况。

从表中可以看出,核能海水淡化的价格非常有竞争力,而且具有不使用化石燃料的优势。

联产

对于联产,我们可以利用火电厂或采用核反应堆燃料的发电站。

中国许多沿海城市缺乏淡水,非常适合安装中小型反应堆进行联产。最终冷却系统中的热水可被用于驱动涡轮机发电。然后,涡轮机的低压蒸汽可用于海水淡化。联产设置的好处是当电网繁忙时,反应堆用于发电;当夜间电网需求较低时,反应堆转向淡化水功能,所以没有浪费能源。

2015年国际原子能机构IAEA发表了阿尔及利亚核能海水淡化的初步可行性研究结果,探讨在地中海

表2 海水淡化厂联合不同类型电厂的成本比较

1100MWe 电厂类型	大概成本 (亿美元)	产水量 (万立方米/日)	包括燃料成本的水价 (美元/立方米)	额外能量输出 (MWe)	温室气体年排放 (万吨)
煤电厂	40	40	3.0 (RO反渗透) 22.0 (MFD多闪蒸)	0	600
天然气电厂	30	40	7.3	0	300
风电厂	60	4.5	12.5	0	碳信用
核电厂	30	40	0.5-1.0 (RO反渗透) 1.5 (MED多效闪蒸)	700	碳信用

沿岸的斯基克达(Skikda)采用核能发电海水淡化联产。与化石燃料相比,选择核能非常有竞争力。

世界核电联产经验

哈萨克斯坦、印度和日本等地超过150堆年的实践经验已经证明了核能海水淡化联产厂的可行性。

*哈萨克斯坦

27年来阿克套(Aktau) BN-350快中子反应堆成功供给高达135MWe功率的电力,同时生产8万立方米/日的饮用水,其功率的60%左右用于供热和海水淡化。它证明了这种联产厂的可行性和可靠性。(事实上,油/气锅炉与它一起使用,10个多效蒸馏MED装置海水淡化能力为12万立方米/日)。

*日本

10家海水淡化设施与压水反应堆电厂联合,生产1.4万立方米/日的饮用水,已经积累了超过100堆年的经验。

*印度

自20世纪70年代以来印度一直从事海水淡化研究。2002年,与双170MWe核电反应堆(重水堆)联合的淡水示范厂在卡尔帕卡姆(Kalpakkam)的马德拉斯原子能电站建立。这种核能淡化海水联合示范项目(Nuclear Desalination Demonstration Project, NDDP)包括一个产能1800立方米/日的RO反渗透装置和一个占成本25%以上的产能4500立方米/日的MSF多级闪蒸设备。这是基于混合的MSF-RO技术、使用来自核电站的低压蒸汽和海水的最大的核能海水淡化厂。过程中有4MWe功率的损失。

自2004年左右一家低温核能海水淡化厂开始运营,它利用特朗贝(Trombay)核研究反应堆的余热,

并为反应器供应补给水。

*巴基斯坦

2010年巴基斯坦委任1家产能4800立方米/日的MED多效蒸馏海水淡化厂与卡拉奇(Karachi)核电厂(一个125MWe的重水堆)联合。虽然在2014年,它一直是运行一个454立方米/日的RO反渗透水厂为自己提供冷却水。

*中国

中国广核集团已委托1家产能10080立方米/日的海水淡化厂利用余热进行海水淡化,为辽宁省大连的新红沿河项目提供冷却水。

*许多相关经验来自于俄罗斯、东欧和加拿大的核电厂(集中供热是一种副产品)。

结论

随着全球人口正在快速增长,水资源短缺变得越来越严峻。2050年90亿人口将如何利用现如今这么少的水?节约用水,特别是城市废水循环利用势在必行。海水淡化价格昂贵、能量密集。但更多的国家正在建设大型海水淡化厂,不只是用于饮用水,而是用于农业灌溉和诸如煤炭开采等水密集型工业。在中国,无论是导致酸雨的空气污染还是向河流倾倒废物等引起的水污染,污染治理是首要任务。利用改进的新RO反渗透海水淡化与核电联产是我们的未来。但是,我们不能忘记世界能源资源不是无限的。

作者简介:郭久亦(Gioietta Kuo),毕业于剑桥大学,并在牛津大学、普林斯顿大学从事研究多年,是一位主攻能源问题的物理学家。联系方式:kuopet@comcast.net。