

新加坡发展膜技术与水务产业的国家战略

禹 庚, 赖光麟

(新疆科技厅国际合作处, 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 世界进入21世纪, 膜技术的研究和应用已经与人类追求经济发展和社会进步密不可分, 尤其是在应对气候变化、能源与水资源短缺、环境污染、医药卫生等世界级重大问题上, 其控制与解决方案无不与膜技术密切相关。本文介绍了新加坡发展膜技术的国家战略、科研团队、科研机构建设及其重点研究领域、企业大规模膜技术应用的情况, 由此提出几点启示。

关键词: 新加坡; 水务产业; 膜技术; 发展战略

中图分类号: F553/557 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2011.01.004

1748年, 法国学者 Abbe Noilett 首次发现自然界的膜渗透现象, 拉开了人类对膜技术研究及应用的序幕。当世界进入21世纪, 膜技术的研究和应用已经与人类追求经济发展和社会进步密不可分, 尤其在应对气候变化、能源和水资源短缺、环境污染、医药卫生等世界级重大问题时, 其控制与解决方案无不与膜技术密切相关。正因为如此, 膜技术被冠之以21世纪绿色高新技术的名称, 受到世界各国政府和科学家的高度重视。

一、政府促进膜技术发展的战略

新加坡是一个淡水资源匮乏的城市国家, 淡水主要根据协议从马来西亚输入^①。在20世纪60年代, 曾经有过因为紧缺而不得已实施配额供水的痛苦经历。人类生产、生活须臾不可或缺的淡水成为新加坡的战略资源。开辟新水源, 提高水的管理和水的循环利用能力, 逐步降低对进口淡水的依赖程

度而最终实现淡水自给, 从新加坡成立之日起, 始终是国家领导人优先考虑的战略问题。

解决淡水资源问题, 不外乎开源和节流, 节流治标, 开源治本。20世纪90年代以前, 受技术等因素的限制^②, 新加坡水资源管理的开源节流主要是: 通过工程措施, 减少跑冒滴漏, 提高科学用水、合理用水的能力; 兴建汇集降雨的水库以作为新水源等。90年代后, 新加坡政府从大规模引进世界顶尖人才入手, 建设国家研究机构, 并逐步形成了政府、研究机构、公司尤其是跨国公司相互密切关联为主要特点的国家创新体系, 对海水淡化和用后水^③再生所涉及的技术, 组织专家进行了深入研究。在广泛听取国内外专家意见的基础上, 放弃了当时较为成熟的以相变技术为基础的海水淡化方案, 决定采用膜技术为核心的方案。与相变技术方案相比, 膜技术方案具有明显的能耗、成本和效益优势, 而且应用范围广泛, 但有一定的技术风险。新加坡集政

第一作者简介: 禹庚 (1957-), 男, 硕士, 新疆科技厅国际合作处处长; 研究方向: 农村经济。

收稿日期: 2010年11月18日

① 马来西亚向新加坡供水主要依据1961和1962年生效的两份协议。1961年的协议将于2011年期满, 新加坡政府已经决定不更新这份协议。1962年的协议有效期至2061年, 新加坡政府的目标是, 在这份协议终止前实现淡水自给自足。

② 在1974年, 新加坡建设了一个采用物理-化学工艺回收用后水的试验厂, 进行技术验证和可行性研究。一年后因为生产成本和设备的可靠性问题而关闭。

③ 新加坡水资源管理部门认为, “废水”是可以技术手段再生而重复使用的, 因此废水不废; “污水”则是一个贬义词。以“用后水used water”的概念替代“废水和污水”, 更符合可持续发展的精神。

府、研究机构、公司尤其是跨国公司之资源,组织开展膜技术攻关与应用研究。

2006年初,为了培育未来核心竞争力,实现知识和创新驱动发展,新加坡成立了由总理李显龙挂帅的“研究、创新和企业理事会”以及隶属总理公署的“国家研究基金会”^①,确定了环境与水务(包括清洁能源)、生物医药、互动数字媒体三大战略研发领域并在2006-2010年共拨付50亿新元予以支持。

经过20多年的努力,目前新加坡已具有一支世界一流水平的膜技术研究、开发与应用队伍,以膜技术为核心的新加坡环境与水务产业异军突起,成为其战略性经济增长点,建立了进口水、集水区水源、新生水和海水淡化四大国家水喉,实现了供水多元化,为最终实现淡水自给自足奠定了坚实的基础。

新加坡政府的目标是:到2015年,新加坡水处理产业国内生产总值达到17亿新元,实现就业岗位1.1万个,成为占全球水市场3%的技术、产品和服务的供应商,以及环球水务中枢(Global Hydrohub)。为了实现这个目标,在2008年,由政府搭台,配合商业目标,举办了首届新加坡国际水资源周(SIWW),以应对挑战、展示技术、发现商机为主题,吸引了世界各国政府官员、专家学者、从业者共8000多人前来出席。国际水周期间,贸易合同金额超过2.7亿美元。这项活动每年在新加坡举行一次。2010年国际水资源周,我国黄河水利委员会因为成功治理数千年来不时泛滥成灾的黄河并得到国际认同而获得“李光耀水源奖”^②。新加坡政府的成功运作,极大提升了新加坡在国际水管理和处理行业的地位,加速了行业技术、人才、资金的汇集。

二、新加坡膜技术研究队伍

新加坡膜技术研究和开发人才主要集中在高

等院校(新加坡国立大学、南洋理工大学)、政府研究机构(先进水技术中心)以及相关企业。其分工为,高等院校侧重基础研究兼顾开发研究,政府机构以检验检测技术研究为主,企业重点在应用研究。

新加坡是膜技术研究起步较早的国家之一。1960年曾经是新加坡国立大学教授的S. Sourirajan制成了具有极薄皮层的非对称醋酸纤维素膜,使反渗透过程迅速地从实验室走向工业应用。

1. 新加坡国立大学膜分离研究实验室^③

新加坡国立大学膜分离研究实验室是1995年美籍华裔学者、国际著名膜技术专家钟台生^④教授受聘于新加坡国立大学后创建的。十几年来致力于膜科学和工程研究,形成了今天有40多位研究人员、实验仪器设备精良、资金充裕,集高级人才培育和研究开发活动于一体的国际一流实验室,在膜材料合成、膜制备、膜组件制作、膜分离系统应用等领域均达到世界领先水平。实验室目前的研究主要集中在高分子膜、高分子和纳米材料的混合基质膜、渗透气膜、纳滤膜、超滤膜、正渗透膜等在能源产品开发、温室气体捕获、污水处理、海水淡化、生物大分子分离及纯化、手性药物的分离等方面的应用。

新加坡国立大学膜分离研究实验室非常重视与高等学校同行的横向合作与交流,与麻省理工、剑桥大学、得克萨斯奥斯汀大学、渥太华大学、复旦大学、武汉大学、台湾中原大学等建立了密切的学术交流与合作关系。同时,也非常重视与企业界的纵向合作,成立了膜行业联盟(industry consortium),吸引了多家跨国公司和行业巨头加盟,如英国天然气公司、德国默克、日本三井物产、美国环球油品公司、新加坡凯发等。这个由新加坡政府支持搭建的平台,汇集了政府、研究机构和企业的人力、物力资

① Research, Innovation and Enterprise Council和National Research Foundation (<http://www.nrf.gov.sg>)

② 颁发以新加坡首任总理李光耀的名字命名的“李光耀水源奖”(Lee Kuan Yew Water Prize包括奖牌、证书和30万新元的奖金),是新加坡国际水资源周(Singapore International Water Week)的重头戏,旨在“表彰通过创意科技解决世界水供问题,或通过落实有效政策和计划改善人类生活的杰出个人或机构”。2009年的得主是研发出净化工业用后水的升流式厌氧污泥床反应器技术的荷兰Gatze Lettinga教授,2008年得主是国际著名膜技术专家加拿大的Andrew Benedek教授。

③ NUS Membrane Research (<http://www.chee.nus.edu.sg/membrane/index.html>)

④ 作为国际知名的膜分离科学家,钟台生教授(Neal Chung)出版了一本专著,在国际专业期刊发表论文350多篇,H指数=35,是科学论文索引中被引用人次最高的新加坡国立大学教授之一。拥有70项授权专利(包括35项美国专利)和申请中专利,其中许多专利成功商业化,如凯发科里斯塔尔600 TM超滤膜,威达?液晶聚合物等。

源,可以就行业内竞争前科学技术问题共同投入并分享研究成果,也可以就一个企业的特定技术问题定向开发和应用研究。

新加坡国立大学与北京大学和牛津大学联合成立的水与环境研究联盟^①于2010年7月1日正式揭牌,这个为期5年、耗资6300万新元的合作计划,涉及联合培养水技术高级人才、合作研究与开发、技术转移等。新达科技^②成为首个加入联盟的膜技术开发应用企业。

2. 新加坡南洋理工大学的新加坡膜技术中心^③

新加坡膜技术中心成立于2008年初,是新加坡政府打造环球水务中枢,实现淡水供应自给自足的重大举措。中心起步虽晚,但起点高。一是政府斥2700万新元重金打造(不含基建),二是聘请了澳大利亚新南威尔士大学的教授Anthony Gordon Fane,一位在水处理方面有很深造诣和影响力的国际权威为中心主任。中心副主任王蓉^④副教授,是新加坡国立大学培养的优秀膜技术研究人才。中心聚集了40多位研究人员。作为新加坡膜技术基础研究和应用研究的突击队,中心设定的目标是:致力于教育和培训,成为培养优秀膜技术博士和高级研究人员的摇篮;致力于研究和开发,在与工业和国际社会密切合作的基础上,成为大力提升膜技术水平的世界级研究中心;致力于应用和推广,成为膜技术领域新技术和创新企业的孵化器。

中心的研究与开发活动主要集中在:淡水处理与海水淡化相关的水生产技术,与用后水再生技术相关的膜积垢感应器、膜积垢处理系统,与膜生物反应器有关的新型膜材料、膜组件等,能源问题的沼气洗涤混合基质膜构建,特定需求及适宜技术研究,感应器和检测仪的研究等。

3. 先进水研究中心

先进水研究中心是新加坡政府公用事业局(PUB)旗下的研究机构,成立于1996年,有研究人员60多人,主要从事水处理技术和水检测技术的

研究。重点领域涉及水的回收利用、工业用后水的处理及再循环、集水区规划及设计研究、超痕量分析、水生物技术、水质安全等。中心以水分析检测见长,且装备精良、手段先进,可检测项目达600多个,占世界卫生组织(WHO)和美国环境总署(USEPA)发布的饮用水标准所列检测项目的95%以上。

新加坡快速发展的以膜技术为核心的水务产业,产生了巨大的聚集效应,企业设立的研发中心由4年前的1家增加到现在的14家之多。Siemens Water Technologies投资5000万新元在新加坡设立有60多位研究人员的全球水技术研究中心,新加坡政府出资400万新元委托其进行海水淡化膜技术节能降耗的研究,因为能源消耗占海水淡化总成本的近80%。GE Water & Process Technologies投资1.3亿新元,与新加坡国立大学合作建设全球水资源研发中心,100多位顶级研究人员从事水处理、系统集成、膜技术、离子交换等领域的研究与开发活动。美国Marmon Water公司与新加坡凯发集团联合投资建设研发中心等。

跨国公司在新加坡设立的研究中心,极大增强了新加坡在膜技术领域研究与开发能力,也增强了其成果转化的能力。企业研究中心的汇集产生了集群效应,提升了新加坡在国际水务产业中的地位,有助于新加坡建设环球水务中枢目标的实现。

三、新加坡膜技术 R&D 概况

膜是一种分子级分离过滤介质,当溶液或混和气体与膜接触时,在压力、电场或温差作用下,某些物质可以透过膜,而另外一些物质则被选择性的拦截,使溶液或混合气体的不同组分被分离。膜技术的最大特点在于:膜是分子尺度的分离,其过程是分子与膜孔道之间较弱的相互作用,不需要添加助剂。依据其孔径的大小,膜可以分为微滤膜、超滤膜、纳滤膜和致密膜;依材料不同,可分为无机膜、

① Singapore, Peking and Oxford Research Enterprise for Water Eco-Efficiency 简称SPORE。

② <http://www.sinomem.cn>新加坡三达国际集团是一家以膜技术开发应用为核心的高科技集团公司,于1996年由蓝伟光博士创立,旗下新达科技、瑞丰生物和中嘉国际均为新加坡主板上市公司。

③ Singapore Membrane Technology Centre (简称SMTc) (<http://smtc.ntu.edu.sg/Pages/default.aspx>)。

④ 拥有25年化学、环境工程以及能源相关领域的研究开发经验,专长气体分离和液体纯化的新型膜材料研制,以及复合膜系统的开发与优化。在国际期刊发表论文76篇,是9项专利的发明人。

高分子膜、生物膜和混合机制膜等。

相对无机膜和生物膜,高分子膜由于其性能优越和制造方便而更具竞争优势。问题的关键是在数量众多的高分子材料中选取适宜的绝非易事。决定高分子材料适用性的四个因素是:价格、可获得性、物理性能和表面化学性能。决定膜的使用效率的3个主要因素是:膜的孔径,依据膜孔径的大小,分离的物质依次为蛋白质、水分子以及气体分子;膜材料的物理及化学性质,纺丝性和机械强度是膜制备的关键;膜功能层厚度,直接影响膜通量。因此,膜材料、膜制备和膜组件始终是膜技术研究的基础。

新加坡膜研究与开发活动主要集中在以下几个领域:

1. 水处理及再生。利用膜技术进行海水淡化、用后水处理进而生产饮用水(纯水)已经被证实是一项低成本、低能耗的技术。科学家攻关的方向是正渗透膜和膜蒸馏技术,以替代成本相对较高的反渗透膜技术,关键是构建长效稳定的膜,以及实现产业化的研究。

2. 能源。膜技术可以用于多种能源的提纯,如氢气、天然气以及生物燃料等。发现新的膜材料、探索制造技术是气体膜分离的关键。

3. 生命科学。分离、纯化医药用途的蛋白质及手性物质的膜材料及工艺研究。

4. 环境科学。膜技术在减少二氧化碳、一氧化二氮、六氟化硫等温室气体排放中将发挥巨大的作用。目前的研究显示出橡胶膜在燃烧尾气的二氧化碳捕捉方面具有通量大等优异特性,富含水蒸气以及其他微粒的燃烧尾气的温室气体分离膜的研究也是关注的重点。

在这几个领域,新加坡的科学研究与开发活动颇有建树。例如:薄膜电泳技术在生物大分子药物(蛋白质、多糖)分离纯化方面的应用,渗透气化膜在生物能源(乙醇、丁醇)分离中的应用,日处理能力1立方米的基于膜蒸馏及膜反应器技术的太阳能驱动小型淡水生产装置的研发,新型高透量纳滤

膜的制备及其在生物医药和环境保护中的应用研究,二氧化碳的膜分离及富集技术研究等项目已经取得成果或阶段性成果,英国天然气、日本三井化学国际等几家公司对研究成果表现出浓厚兴趣,并注资合作研究。

新加坡膜技术研究机构的资金主要来自政府、本地企业以及由国外企业或研究机构以委托研究或联合研究等方式投入的国外R&D资金。新加坡膜技术研究机构的研究经费普遍充裕,并通过行业联盟,与企业形成紧密的合作关系。

四、新加坡水务产业膜技术的大规模应用

新加坡公用事业局^①于1998年高调重启用水回收利用研究,从技术和经济的角度研究以新生水和海水淡化替代进口淡水方案的可行性。

经过技术工艺的小心验证,设计规划的审慎推敲,施工建设的精益求精,从2003年,第一家新生水厂建成投产,到2010年5月,新加坡连续建设了五家新生水厂^②。其中2010年全面投产的樟宜新生水厂耗资1.8亿新元,日产量22.8万立方米,是新加坡规模最大的新生水厂。这个由新加坡胜科集团^③设计、建造、拥有并经营(25-year Design-Build-Own-Operate)的新生水厂把新加坡新生水产量由原来的占全国供水量的15%提高到了30%。

新加坡新生水的生产经过四道工艺,第一是沉淀、曝气等传统水处理,第二是微滤或超滤膜处理,第三是反渗透膜处理,第四是紫外线消毒处理。

2005年9月,由新加坡凯发集团^④负责投资、建设、运营(20-year Build-Own-Operate)的本地第一家新泉海水淡化厂建成投产。该厂总投资2亿新元,日产淡化水13.6万立方米,约占新加坡全国供水量的10%,是世界上最大的采用反渗透膜技术的海水淡化厂。2005年,凯发集团每立方米淡化水的中标价为0.78新元,据说这在当时是世界淡化水售价最低的。运营的第一年,由于设备的稳定性、可靠性、能耗等主要指标大大优于设计指标,加上优化

① Public Utilities Board (<http://www.pub.gov.sg>)

② 五家新生水厂按照投产顺序分别是2003年的勿洛Bedok和克兰芝Kranji, 2004年的实里达Seletar, 2007年的乌鲁班丹Ulu Pandan和2010年的樟宜Changi。

③ Sembcorp (<http://www.sembcorp.com>)

④ Hyflux (<http://www.hyflux.com>)

管理,成本大幅降低,当年淡化水的实际销售价仅为中标价的一半。凯发集团也因为该项目,获得由英国国际水务情报局颁发的2006年全球海水淡化项目优秀奖。

新生水和淡化水,由于纯净度高,主要供应新加坡晶圆、生物制药等工业企业,其余部分进入自来水系统或注入水源地水库以改善水的质量。

随着新加坡人口和经济的增长,生活和工业用水需求也随之增加。预计到2060年,总需求将在目前每天173万立方米的基础上翻一番,其中工业需求将从现在占总需求的55%增长到70%,民用需求将从目前的占45%下降的30%。新加坡国土面积有限,目前,集水区面积已经占到国土面积的一半,计划2011年达到2/3、2060年达到90%,但汇集的总水量有限。为满足需求,新加坡计划在未来的50年里将新生水产量增加3倍,淡化海水产量增加10倍,以分别满足届时50%和30%的用水需求。目前一个与吉宝合作的利用工业尾热、使用膜蒸馏技术进行海水淡化的示范工程正在建设中,第二家海水淡化厂的招标已经启动,几个新生水厂的建设也在规划中。新一轮大规模膜技术应用工程建设期即将启动,期待膜技术将在提高能源效率和可靠性方面取得重大突破。

新加坡在开发新生水和海水淡化项目时,十分注重对本土公司的培养,使这些公司能够随着新加坡水务产业而一同高速发展。例如:凯发由一个经营水处理系统的贸易公司在20年间发展成为市值超过10亿新元的亚洲一流水和流体处理的集团公司,胜科发展成为总资产逾90亿新元的顶尖能源、水务及海事集团,以及吉宝集团(Keppel)等。

新加坡还十分注重吸引外国公司。对有意进军亚太环境与水务市场的外国公司而言,新加坡无疑是个理想的跳板。目前,以新加坡为基地的水务公司约70家,如美国通用电气(GE)、唐纳森(Donaldson)、博莱克·威奇(Black & Veatch)、颇尔(Pall),日本日东电工(Nitto Denko)、德国西门子(Siemens)及法国威立雅(Veolia)等。

在新加坡政府部门的指导下,越来越多的新加坡企业涉足中东、中国乃至全球市场,输出人才、服

务、技术和产品。凯发集团在阿尔及利亚承建世界上最大的反渗透膜海水淡化厂,日生产能力达50万立方米。胜科集团在阿联酋兴建海水淡化厂。凯发、胜科和吉宝集团等在中国的水务产业更是风生水起。

五、启示

纵观以膜技术为核心的新加坡水务产业由被动产起步,到积极参与,进而主导引领的发展过程,不难看出政府的主导和巨大推手。

新加坡是在危机的环境下被迫进行水技术研究的,其紧迫感不仅随着新马关系的张弛而变化,而且随着第一个供水协议的期满失效而日益紧迫。在这种背景下,水成为战略资源。但新加坡政府并没有因此而饥不择食,却是采取审慎的科学态度,加大投入、不断探索、有序推进,在失败中积累经验,在更广泛的国际合作中寻找新的科技出路。

20世纪末,受到国际上使用膜技术进行海水淡化成功案例的鼓舞,新加坡闻讯而动,在广泛国际合作的基础上,调集政府、研究机构以及相关企业的优势资源集中技术攻关。当发现膜技术处理用后水生产新生水的可行性后,优先启动新生水示范工程。随着新生水厂和海水淡化厂投产运营,新加坡成功地迈入了膜技术从理论研究到实践应用的国际领军行列。

新加坡政府没有就此止步,洞悉水务产业的巨大市场潜力,而将其作为国家未来经济增长的主要引擎之一重点打造。凭借跨东西方文化的优势,运用娴熟的外交和市场技巧,借危机外交宣传新加坡水技术取得的成就,借“国际水资源周”和“李光耀水源奖”确立新加坡国际品牌,鼓励企业开拓国际市场,不仅赚了名气,也赢得了市场。

新加坡水务产业的发展,是新加坡政府作为政治家化解危机、赢得主动并最终占领战略制高点的一个成功范例;也是新加坡政府作为经理人以人才为本、技术为突破口、品牌运营为核心、金融资本为纽带、市场为目标,打造战略产业的一个成功案例。

我国是较早开展膜技术研究的国家之一^①,形成了今天逐渐走向成熟的膜技术产业,但无论是研

^① 1958年开始离子交换膜研究,1965年开始反向渗透膜研究等。

究开发还是产业发展均远远落后于市场需求也是不争的事实。新加坡以膜技术为核心的水务产业发展的范例,尤其是起到关键作用的人才政策,高层次引进人才在使用、管理等方面的经验,在高度市场经济和激烈国际竞争的环境下,政府集中优势资源组织科技攻关以及培育产业化的政策和实践等,对我国发展膜技术产业无疑有着积极的指导意义和借鉴价值。

据中国膜工业协会预测,在国家落实科学发展观,发展低碳经济政策的影响下,我国 2010 年膜技术市场需求将超过 200 亿元人民币,而且还将以每年 20%的速度递增。国家科技部等部委将膜技术产业列为“优先发展的高新技术产业化重点领域”,把膜技术提到发展战略的高度给予了前所未有的重视和支持。这无疑将极大促进我国膜市场的发展,对我国的膜技术产业也是一个重大的发展机遇。■

参考文献:

- [1] SCIENCE AND TECHNOLOGY PLAN 2010 by MINISTRY OF TRADE AND INDUSTRY, Published February 2006
- [2] Membrane Research, Membrane Production and Membrane Application in China by Prof. Enrico Deoli in 2007
- [3] 2009/2010 胜科工业实况与数据 Sembcorp Industries (www.sembcorp.com/cn/download/facts&figures2010Chineses.pdf)
- [4] Water for All: Conserve, Value, Enjoy - Meeting our water needs for the next 50 years, PUB, 2010
- [5] Membrane divide and conquer by Neal Chung, "The Straits Times" May 22, 2010
- [6] 蓝伟光. 新加坡的水故事及其对中国的启示. 联合早报, 2009-7-9
- [7] A Lively and Liveable Singapore: Strategies for Sustainable Growth by the Ministry of the Environment and Water Resources, Ministry of National Development in 2009, Singapore
- [8] Membrane Systems for Municipal and Industrial Application by Martin Hind, April 2008
- [9] 董金忠. 新加坡新泉海水淡化厂基本情况介绍. Gireesh Bahu Bhat, Tan Yu Ming, 葛文越, 2007
- [10] 赵婉仪. 满足我国 50 年后 80% 用水需求 新生水淡化海水将增三及十倍. 联合早报, 2010-6-29
- [11] 环球水务中枢 2009 概况介绍. www.edb.gov.sg/edb/sg/zh_cn2/index.html

The Development of Membrane Technology and Water Industry Strategy in Singapore

YU Geng, LAI Guang-lin

(Xinjiang Science and Technology Department, Urumqi 830011)

Abstract: The control and solutions of climate change, energy and water shortage, environmental pollution, and medicine & health are all closely related with the membrane technology in the 21st century. This paper introduces development strategy, R&D research staff, the application of membrane technology, construction of research institutions and key program in Singapore, the paper also gives some suggestions.

Key words: Singapore; Water Industry, Membrane Technology; Development Strategy