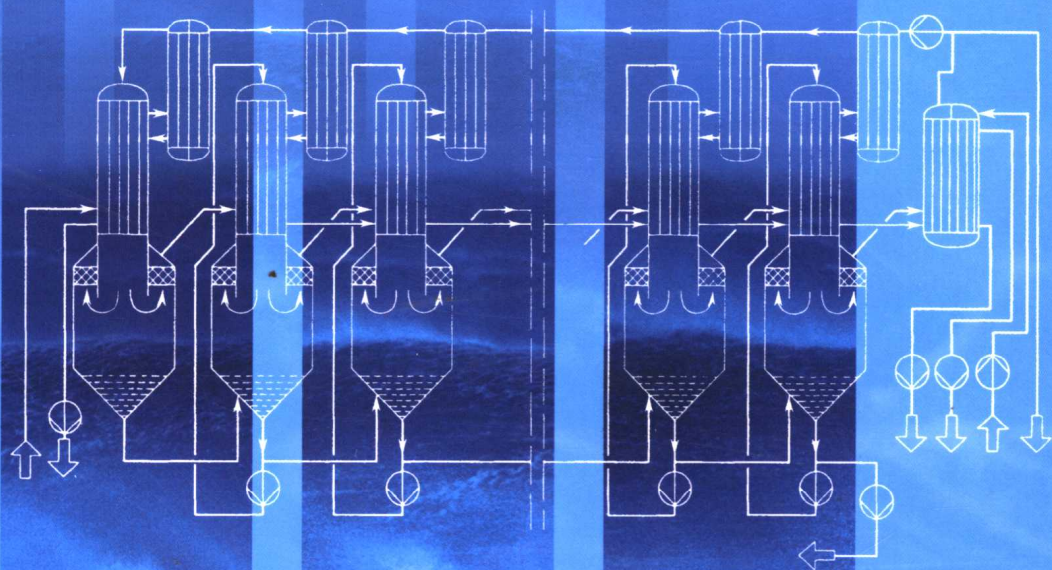


海水淡化工程

王世昌 主编 ●



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

海水淡化工程

王世昌 主编

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

海水淡化工程/王世昌主编. —北京: 化学工业出版社, 2003.2

ISBN 7-5025-4315-5

I. 海… II. 王… III. 海水淡化 IV. P747

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 007995 号

海水淡化工程

王世昌 主编

责任编辑: 董琳

文字编辑: 靳星瑞

责任校对: 蒋宇

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 14 字数 342 千字

2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4315-5/X·253

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序 言

水是生命的源泉，是社会经济发展的命脉，是人类宝贵的、不可替代的自然资源。联合国有关机构指出“水将成为世界上最严重的资源问题。”缺水问题已是一个世界性问题。我国也早认识到缺水已成为制约社会进步和经济发展的瓶颈，这一认识是付出沉重代价才取得的。随着经济持续的发展和人民生活水平的提高，对水量的需求越来越大，对水质的要求越来越高。而水资源的不足，时空分布的不均，加上超限度的开采，无节制的浪费，随意的污染，使本来紧张的水资源供需矛盾更加尖锐。所以，为了我国的可持续发展，对水资源问题的解决是非常迫切的，是势在必行的。

解决缺水问题，是一个综合性社会治理工程，包括社会管理的加强、多方面工程技术的实施，以及人们用水习惯的调整等。海水淡化技术的应用和推广，不仅是一个技术问题，也将对改变社会的用水观念产生深远的影响。

《海水淡化工程》一书，集中了我国一批在海水淡化方面有影响的专家写成，对各种淡化方法从基础理论到工程应用都做了系统而深刻的阐述，还介绍了若干应用实例，无论对技术入门还是对工程实践都是一本参考价值很高的著作。

中国科学院院士、天津大学教授

余国瑞

中国工程院院士、国家海洋局杭州水处理技术中心研究员

高从堦

2002年12月

前 言

海水和苦咸水淡化技术，在我国已有 40 年左右的研究和应用历史。在此期间，电渗析、反渗透、蒸馏等淡化技术相继发展起来。与淡化技术联系密切的超滤、微滤以及其他匹配技术也都相继形成了规模，并在国民经济发展中发挥了巨大作用。

海水淡化是一项保护资源、创造资源的崇高事业。无论藉以缓解缺水问题，还是发展技术出口，都会有很好的经济效益和社会效益。尽管目前我国与先进国家相比，还有不小的技术差距，技术经济指标与社会的期盼值之间，也还存在一定距离，但从长远来看，发展淡化技术从海洋获取淡水是势在必行的。

长期以来淡化界同仁就希望有一本比较全面系统的海水淡化专著，供业内外人士阅读。现在由于化工出版社的热情支持和编写人员的共同努力，这本书终于得以问世。本书各章撰稿人都在相关领域工作多年，且有所造诣。书中取材反映了当代海水淡化技术的最新发展，内容既有理论深度，又结合实际应用，因而可供工程技术人员、研究人员和高校师生阅读和参考。

本书各章撰稿人及分工如下。

第一章、第五章，王世昌（天津大学）；第二章，王世昌、徐世昌（天津大学）；第三章，张洪（国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所）、许莉（天津大学）；第四章，许莉、王志（天津大学）；第六章，郑领英（中国科学院大连化学物理研究所）；第七章，林斯清（国家海洋局杭州水处理技术研究开发中心）；第八章，陈益棠（国家海洋局杭州水处理技术研究开发中心）；第九章，张维润（国家海洋局杭州水处理技术研究开发中心）、解利昕（国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所）。

本书主审为高从堦院士，编者特致谢忱。

编者
2002 年 12 月

内 容 提 要

海水淡化是水资源可持续利用的重要方面，是解决缺水问题的重要方法。

本书全面阐述了海水淡化技术的现状、处理技术、应用等，分为蒸馏法、膜法、电渗析法三种主要方法加以介绍。

本书紧密结合生产实践与先进技术，具有较强的实用性。本书可供从事海水淡化工程、污水处理的技术人员以及相关专业的职业院校师生参考。

目 录

第一章 概论	1
第一节 水资源问题.....	1
一、中国的淡水资源.....	1
二、我国水资源的特点.....	2
三、世界面临淡水危机.....	3
第二节 海水淡化技术.....	3
一、海水淡化发展概况.....	3
二、海水与苦咸水淡化方法.....	4
三、海水淡化技术的应用与发展.....	5
参考文献.....	7
第二章 多级闪蒸	8
第一节 多级闪蒸原理.....	8
一、多级闪蒸过程.....	8
二、过程参数及其相互关系.....	9
第二节 多级闪蒸级数分析与确定.....	15
一、传热面积法.....	15
二、能量法.....	16
第三节 过程参数选定原则.....	20
一、盐水最高温度.....	20
二、蒸发比(造水比)与级数、级间温差的关系.....	21
三、蒸发比与级数、传热面积的关系.....	21
四、多级闪蒸中的温差损失.....	21
第四节 多级闪蒸过程简捷计算方法.....	22
一、基本工艺参数确定.....	22
二、各级工艺参数计算.....	23
第五节 多级闪蒸器.....	25
参考文献.....	29
第三章 多效蒸发淡化过程和设备	30
第一节 多效蒸发淡化原理.....	30
第二节 多效蒸发过程.....	31
一、多效蒸发计算.....	31
二、有关海水蒸发的基本概念和部分物性数据.....	42
第三节 多效蒸发工艺流程和设备.....	46
一、多效蒸发流程的分类.....	47
二、多效蒸发设备的分类.....	47

三、脱盐常用的几种蒸发器	49
参考文献	52
第四章 压汽蒸馏与太阳能蒸馏	54
第一节 压汽蒸馏	54
一、压汽蒸馏的原理及特点	54
二、压汽蒸馏的高速发展	55
第二节 太阳能蒸馏	60
一、直接法	61
二、间接法	62
第三节 蒸馏法与其它方法相结合	63
一、膜蒸馏	63
二、多种蒸馏方法与热泵的结合	64
三、蒸馏法中各种方法的前景	64
参考文献	64
第五章 海水预处理	66
第一节 碱性垢的成因和控制	66
第二节 硫酸钙垢的形成与阻垢原理	68
第三节 海水中溶解氧的脱除与海水预处理工艺	69
一、海水中溶解氧的脱除	69
二、海水预处理工艺	70
参考文献	72
第六章 反渗透淡化技术基础	73
第一节 概述	73
一、反渗透技术的发展概况	73
二、反渗透盐水淡化技术的特点和现状	73
第二节 反渗透基本原理	75
一、渗透和反渗透	75
二、反渗透的分离机理和传递方程	76
三、浓差极化	81
第三节 反渗透膜	84
一、反渗透膜材料	84
二、反渗透膜制备	91
三、反渗透膜表征	103
四、反渗透膜的开发过程和现状	107
第四节 反渗透组件	108
一、板框式	108
二、管式组件	109
三、中空纤维组件	111
四、螺旋卷式组件	115
五、四种反渗透组件的比较	117

六、我国反渗透膜组件的开发和现状	123
参考文献	125
第七章 反渗透淡化工程	127
第一节 工程设计	127
一、概述	127
二、海水反渗透淡化工程的基本组成	127
三、RO 工艺参数及其限制范围	127
第二节 给水预处理	131
一、预处理的重要性	131
二、膜材料与给水预处理的关系	132
三、RO 给水的水质指标	133
四、给水预处理的基本内容	133
第三节 SWRO 系统的污染问题与控制方法	138
一、悬浮物和胶体	138
二、无机盐结垢	139
三、生物污染及其控制方法	142
四、有机物污染及其控制方法	143
第四节 新的预处理技术	144
一、微滤和超滤	144
二、纳滤 (NF)	146
第五节 膜的清洗	147
一、清洗的基本原理与正确预处理的关系	147
二、什么时候需要清洗	147
三、清洗的装置	148
四、污染原因及其特征	148
五、清洗试剂的选用与清洗配方	149
六、清洗技术	151
第六节 SWRO 的高压泵和能量回收	152
一、高压泵	152
二、能量回收	152
参考文献	153
第八章 纳滤膜过程	155
第一节 纳滤概论	155
一、定义	155
二、纳滤膜与组件	156
三、纳滤膜分离特征	158
第二节 纳滤膜传质机理	160
一、固定电荷模型	161
二、空间电荷模型	161
三、杂化模型	161

四、Donnan 平衡	161
五、广义 Nernst-Planck 方程	162
第三节 纳滤膜应用	162
一、在水处理领域中应用	162
二、废水处理与回用	169
三、医药领域的应用	173
四、食品加工	174
参考文献	176
第九章 电渗析淡化技术	179
第一节 电渗析淡化技术的发展及应用	179
第二节 电渗析过程	180
一、电渗析原理	180
二、电渗析能耗	181
三、Donnan 平衡理论	182
第三节 离子交换膜	184
一、离子交换膜	184
二、实用离子交换膜的性能要求	185
三、商品化离子交换膜	185
第四节 电渗析器	186
一、电渗析器主要部件	186
二、电渗析器的组表	189
三、国产电渗析器的规格和性能	190
第五节 极化和极限电流密度	191
一、极化现象和极限电流密度经验式	191
二、V-A 曲线法测定极限电流	194
第六节 电渗析工艺计算	195
一、基础计算式	195
二、四种脱盐流程	196
三、流程设计计算	197
第七节 电渗析脱盐场地设计	198
一、原水的利用	198
二、电渗析进水水质要求	201
三、预处理系统	201
四、电渗析脱盐场地的布置	202
五、电渗析器的稳定运行措施	204
第八节 频繁倒极电渗析装置 (EDR)	205
第九节 西沙电渗析海水淡化装置	207
一、脱盐流程	207
二、脱硼	209
参考文献	212

第一章 概 论

关于“水”是一个永远也说不完的话题。大量的资料和论著表明，如果我们还是像现在这样取水和用水，将会产生一系列的严重后果；这种资源一旦耗尽，经济的发展，各种生态系统以至人类的健康与生存都将受到威胁。关于水的问题，人们已经讲了很多至理名言。政治家说“世界未来争夺资源的战争将会由水引发”；科学家说“水是不可替代的”，“水是永远也做不完的科学命题”；经济学家预言“能源危机之后，下一场危机将轮到水源危机”。

因此，有关专家呼吁，如果各国政府不从现在开始，投入更多的资金治理水资源，20年后将有数十亿人口用不上洁净水。估计21世纪水对人类的重要性将同石油在20世纪对人类的重要性一样，它将成为一种决定国家富裕程度的珍贵商品。水业将是21世纪最大的行业。

第一节 水资源问题

一、中国的淡水资源

世界上的水对人类的应用来说，似乎发生和存在于错误的时间、错误的地方和错误的质量。这是指降水都集中在雨季，而大量流逝；绝大多数水都存在于大海，其次是冰山；至于水质，大海总共约有 $13.8 \times 10^9 \text{ km}^3$ 的水，都不能饮用。

这种现象在我国也是很突出的。我国的淡水资源既患贫，又患不均。人均水量既少，时间和地域分布上又很不均匀。近十多年来由于各城市各地区的经济增长迅速，再加上连续几年降水偏少，水的供需矛盾更显突出！

根据20世纪80年代有关部门的估算，我国平均降水总量约为 $6.19 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，折合降水深度648 mm，低于全球平均降水深度约20%。降水量中约有56%消耗于蒸发，44%形成河川径流。

我国是同纬度冰川最多的国家之一，高山冰川总面积约 58600 km^2 ，冰川总储量 $5130 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，平均年冰雪融水量约 $56 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，分布于内流和外流的河流之中形成径流量。我国的水资源量示于表1-1。

表 1-1 中国分区降水量及水资源量^[1]

分 区	流域面积 /10 ³ km ²	降 水 量		径 流 量		地下水资源 /10 ⁹ m ³	水资源总量 /10 ⁹ m ³
		/mm	/10 ⁹ m ³	/mm	/10 ⁹ m ³		
黑龙江	903	496	447.6	129	116.6	43.1	135.2
辽河及其它河	345	551	190.1	141	48.7	19.4	57.7
海滦河	318	560	178.1	91	28.8	26.5	42.1
黄河	795	464	369.1	83	66.1	40.6	74.4
黄河及山东诸河	329	860	283.0	225	74.1	39.3	96.1
长江	1809	1071	1936.0	526	951.3	246.4	961.3
东南诸河	240	1758	421.6	1066	255.7	61.3	259.2
珠江及华南诸河	581	1544	896.7	807	468.5	111.6	470.8
西南诸河	851	1098	934.6	687	585.3	154.4	585.3
内陆河	3374	158	532.1	34	116.4	86.2	130.4
全国	9545	648	6188.9	284	2711.5	828.8	2812.4

可见我国的淡水资源总量年均约 $2812 \times 10^9 \text{ m}^3$ 左右，但人均占有量很低，仅居世界第 108 位。在表中河流径流量 $2711 \times 10^9 \text{ m}^3$ 中，平均每年流入海洋和流出国境的水量为 $2456 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，而这部分水是维持河流径流量的主体，在很大程度上是不可缺少的。

二、我国水资源的特点

我国淡水资源总量不少，人均偏低。河川径流总量居世界第六位，仅低于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印尼，但按人均和亩均占有水量都低于世界平均水平。人均量为世界的 $1/4$ ，亩均量也只有世界亩均量的 $3/4$ 。

地域分配不均。降水量和径流量集中在东南沿海，而几乎占一半国土的西北内陆均属于干旱或半干旱地区。图 1-1 示出我国年均降水量的地域分布。

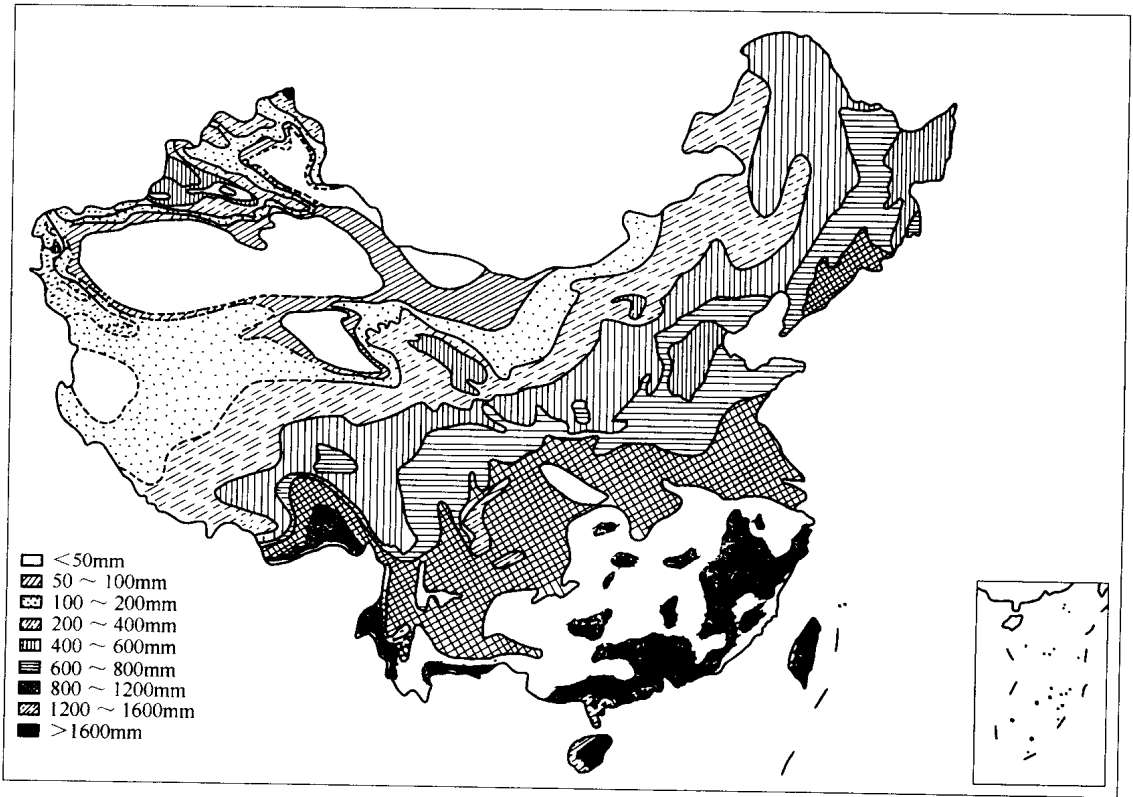


图 1-1 我国年均降水量的地域分布

降水时间集中。每年约 4 个月的汛期，降水量和径流量占全年的 $60\% \sim 80\%$ ，这就导致年径流最大与最小的比值，从南向北达到 $2 \sim 4$ 倍至 $15 \sim 20$ 倍。至于丰水年与枯水年，除了总降水量有很大差别之外，这种比值将会更大。

人均总水量的不足再加上降水量在时间和地域上的严重不均，给经济发展带来了巨大的困难。根据 2000 年中国水资源公报，我国北方城市缺水情况极为严峻，一些大城市出现了建国以来最为严峻的缺水局面。据统计，全国 610 个中等以上城市，不同程度缺水的就达 400 多个，其中 32 个百万以上人口的大城市中，有 30 个长期受缺水的困扰。北京的人均水资源不足 200 m^3 ，仅为全国人均水平的 $1/8$ ，世界人均水平的 $1/30$ 。环渤海经济圈，包括津、沈等城市及辽东半岛和山东半岛，人口高度集中、经济高速增长，缺水问题已经成了这些城市经济增长与持续发展的制约因素，对个别城市甚至是持续生存的关键。

到 21 世纪中叶我国将建成一个中等发达的国家，总人口达到一个稳定的数值，约 16 亿。预计在节约用水的前提下，需水总量约为 $7770 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，中国目前总供水能力约为 $5255 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，也就是说，今后 30 多年还需增加供水能力 $2500 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[1-5]。因此，如不及时采取措施，将会严重影响到国家这一宏伟的发展目标。

三、世界面临淡水危机

世界的缺水情况是显而易见的。联合国人口基金会的专家指出，目前世界有 5 亿人口饮不上清洁水，到 2025 年这个数字将暴增 5 倍以上，达到 28 亿，约占届时预计全球人口 80 亿的 35%。那时淡水危机真的会到来！

据目前的统计，世界上最缺水的 20 个国家主要在中东和北非。然而，实际上除了上述最缺水的国家之外，其它地区以及水资源相对丰富的国家都有不同程度的缺水问题。保守统计，在 21 世纪初期，仅地中海周围地区每天就缺水 1 千多万吨，而亚洲和中南美等的缺水量也将达到每天几千万吨。

上列情况反映出，水在某些地方已经成为生死存亡的问题，而不仅是方不方便的问题；而在另一些地方（如欧、美和亚太地区）则要遭到生活质量降低的打击。出路何在？自然有多个途径，如继续找水，长途调水，废水回用，制定政策节约用水等。然而要利用现代技术大规模开辟新的水源，则首推海水淡化。事实上这已经确定无疑地成了全世界的必然趋势。只不过各国各地区问题的严重程度不同和反映的早晚不同而已。进入 20 世纪 90 年代水源危机日益突出，大多数国家都直接、间接地卷入了海水淡化技术的发展潮流。无论暂时的成本如何高，各国都在努力发展或做发展准备。这些年来世界海水淡化会议和淡化协（学）会参加的地区和国家越来越多就是明显的例证。

第二节 海水淡化技术

一、海水淡化发展概况

关于海（盐）水淡化我国 2000 多年前就有记载。《山海经》和东汉时孔融的《同岁论》都提到“弊簞淡卤”现象，指的是古时人们发现蒸饭的竹席，经长期使用后形成的一层膜具有吸附和离子交换功能，可吸附盐分，“能淡盐味”。宋人还记载了具有淡化海水功能的“海井”器物^[6]。我国北方沿海农民多年前就有取海冰保墒的习惯，这是冷冻法淡化海水的直接利用。

西方国家海水淡化器的出现与航海的兴起有关。到 19 世纪，就有了用明火直接加热的单效船用蒸馏器。后来随着制糖工业发展、蔗糖溶液的蒸发和结晶，出现了多效蒸发。这一步的跨出，直接影响到现代多效蒸馏海水淡化技术的形成和发展^[7]。

联合国关于非常规水源的研究报告指出，从 1950~1985 年的 35 年间，海水淡化的发展经历了三个阶段，即发现阶段，开发阶段和商业化阶段。在这期间研究开发的精力主要集中在蒸馏、冷冻、电渗析和反渗透^[8]。在此后的十多年中蒸馏法和反渗透法都发挥了更大作用，形成了当代海水淡化与苦咸水淡化技术与市场的主体。到 1998 年，全世界淡化水生产能力达到日产 $2300 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，两年后的 2000 年则达到日产 $2700 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，平均以 7%~8% 的增长率攀升。从地区分布来讲，虽然淡化水生产能力半数以上都在中东国家（约占 2000 年世界淡化水生产能力的 52%），但发达国家特别是美、日和欧洲国家也占了很大比重。淡化水已养活了世界上 1 亿多人口。

研究开发现代化含义上的海水淡化技术，我国始于 1958 年。从电渗析着手；约十年以

后开始注意到反渗透技术；再过将近十年（1975年）开始研究大中型陆用蒸馏装置；又过了十年（1986年）引进建设日产 3000 m³ 的电厂用多级闪蒸海水淡化装置；又是在十年以后（1997年）建成舟山日产 500 m³ 海水反渗透淡化装置。在此之后我国日产千吨级的海水反渗透淡化装置和日产 18000 m³ 的苦咸水反渗透淡化装置才相继建成。而海水反渗透膜的生产线也在这期间成功投产。这标明我国的反渗透技术进入了逐步成熟的时代^[9]。

二、海水与苦咸水淡化方法

至今海水与苦咸水淡化方法已经出现了数十种，主要包括蒸馏法、膜法、电渗析法和冷冻法等。

1. 蒸馏（蒸发）法

其原理是显而易见的，即加热-蒸发-冷凝。但设备型式有多种，可分为三大类。

多效蒸发（ME） 浸没管单效和多效蒸发（STE 或 ST），早期多用。

竖管多效蒸发（VTE）

水平管多效蒸发（HTE），当前称作高温和低温多效蒸馏（MED）的也属此类。

闪蒸（FLASH） 低温单级闪蒸（SSF）

多级闪蒸（MSF），目前世界上特别是中东使用最多、规模最大的一种。

压汽蒸馏（VC） 机械压汽蒸馏（MVC）

热力压汽蒸馏（TVC）

实际上，按蒸发器型式细分还有很多种，如多效蒸发中又有长管升、降膜式，自然循环与强制循环式等；而多级闪蒸中，又有水平式、竖管式、沸腾床式、横管式与长管式等。

2. 膜法

用于海水和苦咸水淡化的膜法，从过程原理上分，主要有三种。

反渗透（RO） 以压力差为推动力的淡化过程。这是目前发展最快使用最多的淡化技术，由于膜的种类不同，有卷式膜组件，中空纤维膜组件之分。

膜蒸馏（MD） 多以温度差为推动力的脱盐过程（蒸汽通过疏水微孔膜的蒸发过程），但也有浓度差的设计。规模小，使用很少。

纳滤（NF 或膜软化 MS） 以低压差驱动的反渗透过程。目前主要用于截留二价离子（除硬），但也有一定程度的除盐（除一价离子）的效果。近年发展也很快。

3. 电渗析法

电渗析（ED） 以电位差为推动力，利用离子交换膜的选择透过性而脱除水中离子的淡化过程。但为了防止因浓差极化而引起的膜面结垢，采用频繁自动倒换电极极性的电渗析，被称为频繁倒极电渗析（EDR）。ED 和 EDR 主要用于淡化苦咸水。

电去离子（EDI） 将电渗析与离子交换结合，在电渗析器的淡水室中填充离子交换剂，在直流电场的作用下，即实现电渗析过程、离子交换除盐和离子交换连续电再生的过程。这可以说是 ED 过程的一种发展，但除盐的原理和操作特性已经发生了深刻变化。且 EDI 并不用于苦咸水淡化，主要用于高纯水生产。

4. 冷冻法

将海水冷冻到冰点以下，淡水结冰、分离、再融化为淡水的过程。冷冻法有利用天然冰法和人工冷冻法两种。但二者都尚处于研究中。

三、海水淡化技术的应用与发展

以上诸多方法中，目前工业上采用的主要有以下几种，即多级闪蒸（MSF）、反渗透（RO）、多效蒸馏（ME或MED）和压汽蒸馏（VC），此外便是电渗析（ED或EDR）。后者基本上用于苦咸水淡化。

反渗透法 无论海水、苦咸水，亦无论大型、中型或小型都适应，是海水淡化技术中近二十年来发展最快的。除海湾国家外，美洲、亚洲和欧洲，大中生产规模的装置都以反渗透为首选。

多级闪蒸 目前全球淡化水总产量中，仍属第一，技术最成熟，运行安全性高、弹性大，适合于大型和超大型淡化装置，主要在海湾国家采用。MSF总是与火力电站联合运行，以汽轮机低压抽汽作为热源。目前日产 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的单机已投入商业运行，日产 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的单机正进行设计^[10]。这都是世界上最大规模的海水淡化装置。一个国家要发展海水淡化产业，从事技术出口贸易就不能不考虑中东这一巨大的市场及其使用特点。

多效蒸馏（发） 也主要与火电站联运，但规模一般在日产 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以下。这包括两种类型，一类是各效分列式，操作温度一般较高，顶温 $100 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ，我国和欧洲一些火力电厂都有使用；另一类是低温多效蒸馏（LT-MED），顶温 $65 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。后者较前者具竞争力，是蒸馏法中最节能的方法之一。有关专家认为，今后 MSF、RO 和 MED 将决定海水淡化的未来，这是过去 40 年的发展得出的结论^[14]。

压汽蒸馏 用电或蒸汽驱动，也属于最省能的淡化方法之一。但规模一般不大，多为日产千吨级。

几种主要的淡化方法中以反渗透法发展速度最高，淡化水成本也降得最快。就全球各主要方法产水量相对密度来说，1998 年 IDA（国际脱盐协会）公布的统计结果，MSF 为 44.1%，RO 为 39.5%，ME 为 4.05%^[15]；两年以后，MSF 降为 42.4%，RO 为 41.1%，而 NF/MS 也迅速上升。很明显，RO 的产水容量很快就要超过 MSF。

在实际选用中，究竟哪种方法最好，也不是绝对的，要根据实际条件而定。包括规模大小、能源费用、原水水质、气候条件以及技术与安全性要求等。因此各地区各国家选择的淡化方法并不一致，图 1-2 示出海湾 6 国所选用的几种淡化方法产水量与全世界几种方法总产量的比较^[10]。从其中可以看出，全世界的多级闪蒸（MSF）都是集中在海湾国家，而反渗透（RO）则只占次要地位，电渗析（ED）与压汽蒸馏（VC）所占分量极少，多效蒸馏（ME）则基本没有采用。

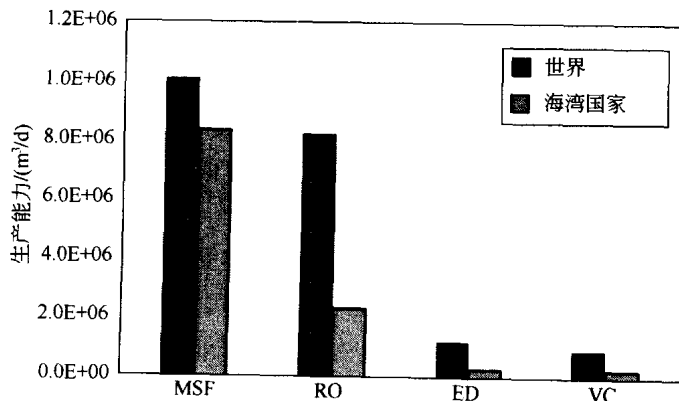


图 1-2 海湾 6 国淡化方法与世界的比较^[10]

图 1-3 示出北美地区多种淡化方法和净水方法到 2005 年的应用和发展情况^[11]。苦咸水(地表水)反渗透一直应用最多; 20 世纪 80 年代后期开始膜软化(纳滤)迅速崛起; 90 年代后期低压膜(微滤与超滤)又以更高速度在水处理中采用, 虽然这不是淡化过程, 但对海水淡化技术的发展有重要影响。

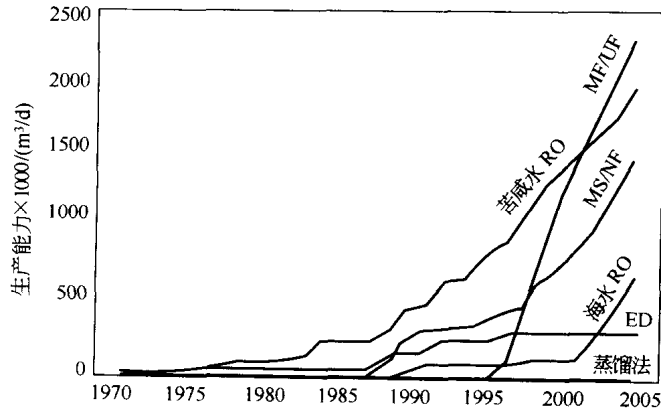


图 1-3 到 2005 年北美地区各种淡化方法和净水方法的应用与发展情况

日本现有淡化水生产能力为 1009600 m³/d, 主要采用反渗透法。冲绳日产 40000 m³ RO 厂的投产, 福冈日产 50000 m³ RO 厂的建设, 对亚洲邻国如新加坡等提供了更多的经验和决策依据^[12]。

图 1-4 为 1991~2001 年间世界各地采用的淡化方法比较^[13]。很明显, 其中的热法(MSF, VC)仍是中东国家的首选, 其次便是反渗透。而其它地区都基本上选用反渗透。

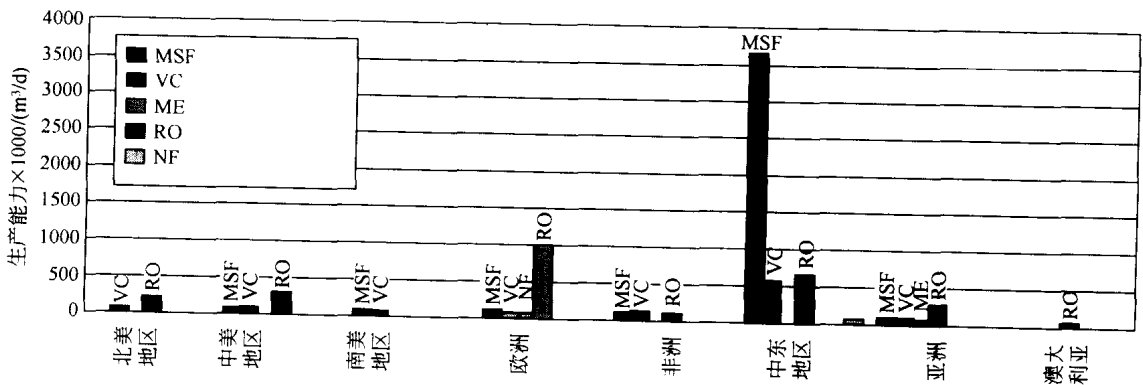


图 1-4 1991~2001 年间世界各地建设的海水淡化装置不同方法比较

现代海水淡化技术尽管已经有半个世纪的发展历史, 而且在全球范围内取得了巨大成功, 但人们认为对于某些关键技术, 新的技术突破目前似乎还不太明显, 包括新的廉价能源技术、传热技术、材料技术以及新过程等。

社会的发展和人类的需求都对研究开发更新、成本更低廉的淡化技术提出了更高要求, 国际学术界曾对此展开过热烈讨论。相信在不久的将来, 将会另有影响更大的淡化技术, 或新的技术集成出现, 从而对人类的生存、发展产生更深远的影响。

海水淡化与海水化学资源综合利用是一项保护资源, 创造资源, 为国家发展和子孙造福的崇高事业, 我们应当想得早一点, 看得远一些。

不可否认,海水淡化在国内外都仍有若干尚待解决的问题,成本也还偏高。可是当今发达国家都十分重视发展海洋经济,利用海洋优势,宁愿以较高的成本从海洋取水,以换取发展经济的宝贵时间和机会。在经济发达的沿海地区,水的价值远不是传统的、静止的价值能衡量的。在很多情况下,过分调水给被调地区经济带来的长远损失远远超过淡水本身的价值。因此一味地从外地调水无异于挖肉补疮;长时间地等待传统观念中的“廉价”水源,必定坐失良机,因小失大。

参 考 文 献

- 1 谢家泽, 陈志恺. 中国水资源. 地理学报, 1990, 45 (2), 210
- 2 中华人民共和国水利部. 2000年中水资源公报
- 3 张光斗. 面临 21 世纪的中国水资源问题. 地球科学进展, 1999, 14 (2), 16
- 4 王建华, 江东, 陈伟友等. 21 世纪中国水资源问题与出路. 国土与自然资源研究, 1999, 第 2 期
- 5 高从增. 我国水资源现状和开发保护对策. 中国水处理和海水淡化技术应用与发展研讨会, 论文集. 科技部高新技术司主办. 北京, 1999
- 6 闻人军, 李仲钦, 陈益棠. 膜脱盐技术源流考. 水处理技术, 1989, 15 (2), 63
- 7 Birkett J D. Proceedings of IDA World Congress on "Desalination and Water Sciences", II : 3. Abu Dhabi, 1995, Nov. 18~24.
- 8 United Nations Report. Natural Resouces/Water Series No. 14, p. 8, New York, 1985
- 9 王世昌. 我国海水淡化发展战略探讨. 中国水处理和海水淡化技术应用与发展研讨会论文集. 科技部高新技术司主办, 北京, 1999
- 10 Abdumajeed Ali Alawadhi. Desalination—Where are we now? GCC Countries, Desalination and Water Reuse, 2002, Vol. 12/1, 12
- 11 Birkett J D. *ibid.*, North America, p. 24.
- 12 Tolaro Goto. *ibid.*, East and South East Asia, p. 28.
- 13 Wangnick K. *ibid.*, Europe, p. 31.
- 14 Rautenbach R, Widua J, Schafer S. Reflections on Desalination Processes for the 21st Century, Proceedings of IDA World Congress on "Desalination and Water Sciences", I : 117, Abu Dhabi, 1995, Nov. 18~24.
- 15 Wangnick Consulting GMBH. 1998 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory Report, No. 15.