

第 25 章 膜材料与海水淡化

吴礼光 高从堦

25.1 概述

水是生命的摇篮,是人类赖以生存和生产的不可缺少的基本物质,是地球上不可替代的宝贵的基础自然资源,是生态环境的控制性要素之一,同时也是重要的战略性资源,是一个国家综合国力的有机组成部分。

进入 21 世纪,全球淡水资源短缺问题日益突出,已成为国际社会普遍关注的焦点。联合国于 1999 年指出,21 世纪水将成为全世界最紧缺的自然资源,并警告:除非各国政府采取有力措施,否则到 2050 年,全世界将有近三分之一的人口(约 23 亿)无法获得安全的饮用水。2000 年联合国又通过决议,确定 2003 年为“国际淡水年”,进一步唤起世人对水资源的关切。

我国淡水资源总量为 2.8 万亿吨,名列世界第六,但人均占有量只有 2200t,仅为世界人均的 1/4,排名 109 位,是世界 13 个贫水国家之一。目前在中国有近 300 个城市缺水,其中 110 个城市严重缺水,主要分布在华北、东北、西北及沿海地区,而且大部分地区还处于“粗放型、高能耗、低产出”的用水模式。从城市发展看,21 世纪中叶中国的城市化率可能达到 70%,城市供水矛盾必然更加尖锐。

随着世界经济的快速发展,中国加入 WTO 并实施西部大开发,各地对水资源的需求量不断增加,特别是在沿海开放地区及西北地区。我国沿海地区含 11 个省、区和直辖市,陆地面积占国土总面积的 15%,有 18 000 多公里的海岸线和 6500 多个岛屿,人口占全国的 40%以上,社会总产值占 60%左右,是我国人口最多、经济最发达的地区。而该地区的可持续发展也面临水资源日趋紧缺的严峻形势,大多数沿海工业城市人均水资源量低于 500t,而大连、天津、青岛、连云港等城市的人均水资源量均低于 200t,处于极度缺水状况,属资源性缺水。沿海城市和海岛承受着淡水匮乏和环境污染的双重压力,这严重制约了该地区经济和社会的发展。

我国城市 2000 年缺水达 600 多亿吨,每年因缺水而损失,仅工业产值就达 2400 亿元。据中国工程院《21 世纪中国可持续发展水资源战略研究》报告估算,到 2010 年我国需水量 7300 亿吨,可供水量 6200 亿~6500 亿吨,总缺水量将达到 1000 亿吨。远距离甚至跨区域调水固然能解决部分地区的燃眉之急,但是调水投资越来越

高。目前中国农业部门的灌溉用水需求约为每年 4000 亿吨, 约占用水总量的 85%, 非农业用水仅占用水总量的 15%, 在今后三十年间非农业用水将增加约 5 倍。很明显, 这种情形是不可能实现的, 因为耗水量不可能长期超过可持续的供水量。因此, 中国水资源的分配和使用方式正面临根本性的变化, 寻找一种更加经济、有效且具有长远意义的解决途径已成了当务之急。

地球是水的故乡, 尤其是海洋, 更是人类世界最大的水库。全球水的总储量为 13.6 亿立方公里, 海水就占有 97.2%, 但人类可取用的地表水和浅层地下水仅为 0.65%, 且随地域和季节变化分布极不均匀。

海水淡化不仅是某一国家和地区, 某一时期的暂时性的局部问题, 也是世界范围内涉及人类生存和社会发展的长远而重大的问题。向占全球水总储量 97.2% 的海水要水, 是解决沿海地区水资源短缺的战略途径, 是繁荣沿海经济的重要措施。世界上已有一亿多人口靠海水淡化解决用水的问题。用海水淡化技术向大海要淡水, 满足沿海城镇和岛屿对淡水的需求或紧急需求, 是完全可行的, 在许多情况下是经济的。目前我国已经具备了日产万吨级的海水淡化的工程能力, 海水淡化已在我国的一些地区应用多年, 吨水成本已降至 5 元左右, 技术经济指标达同等容量的世界先进水平。表明海水淡化能解决沿海地区和岛屿缺水问题、也是解决城市紧急用水补充问题的重要手段, 在许多情况下是最佳的选择。

海水淡化(包括苦咸水淡化)可据所需水质和水量要求为所需地区连续地提供淡水, 为缺水地区(我国沿海地区, 北方和西北地区)人民生活、经济发展和生态维持提供淡水保证。可向海岛和船供水, 利于海防建设和提高续航力, 保证国家安全。

25.2 膜法海水淡化国内外发展现状与趋势

海水淡化是从海水中获取淡水的技术和过程。早在 20 世纪 50 年代, 为解决“水的危机”, 美国从 1952 年起专设盐水局, 1974 年后转为资源技术局, 不断推进水资源和脱盐的技术进步, 其中反渗透法海水淡化(SWRO)就是 1953 年据膜和海水界面有一纯水层而提出的; 1973 年日本通产省下设造水促进中心, 专门研究节能的脱盐技术, 欧洲则在尤里卡等计划下推动海水淡化发展, 它们也都以膜法为重点。经过近 50 年的研究、开发和产业化, 反渗透膜法海水淡化自 70 年代进入海水淡化市场之后, 发展十分迅速。RO 用膜和组件已相当成熟, 工艺过程也逐渐成熟。近年来, 功交换器和压力交换器的开发成功使能量回收效率都高达 90% 以上, 从而使 SWRO 的本体能耗在 $3\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 淡水以下, 成为从海水制取饮用水最廉价的方法, 进一步增强了 SWRO 的竞争力。近几年来, 在国际海水淡化招标中, SWRO 以投资最低、能耗最省、成本最低、建造周期短等优势而屡屡中标。SWRO 所以能如此成功, 与

其在膜、组器、设备和工艺等方面的创新性开拓是分不开的。下面是这几方面的简要的发展概况。

25.2.1 反渗透膜

25.2.1.1 膜材料

膜的基本性能都取决于膜材料（如强度、耐热性能、化学性能、传质性能等）。从这点上讲，没有好的膜材料就得不到满意的膜，所以膜材料的选择，合成或改性，表征和评价等就是非常重要的。

到目前为止，国际上通用的反渗透膜材料主要有醋酸纤维素（CA）和芳香族聚酰胺（a-PA）两大类，另外在开发过程中也制备过其他一些材料的膜。在反渗透膜发展的历史中，不对称膜和复合膜的研发是创新两个范例。Loeb 和 Sourirajan 于 1960 年制得了世界上第一批高脱盐率、高通量的不对称醋酸纤维素反渗透膜，其创新在于，以往的膜皆为均相致密膜（约 0.1mm 厚），传质速度极底，无实用价值，而不对称膜仅表皮层是致密的（约 0.2 μ m 厚），就这一点，使传质速度提高了近 3 个数量级。不对称膜在高压下中间过渡层有压密现象，使水通量下降，为此在 1963 年提出了复合膜的概念，其创新点在于膜的脱盐层和支撑层分别由优选的材料来制备，如脱盐层（约 0.2 μ m 厚）是芳香族聚酰胺，支撑层是聚砜，这使膜的性能进一步提高。为了简明，表 25-1 和表 25-2 分别以不对称膜和复合膜来加以说明。

表 25-1 不对称膜的发展概况

年 份	膜 材 料	备 注
1960	CA	Loeb-Sourirajan 研制出世界第一张不对称膜
1963	CA	Manjikion 的改性膜
1968	CT-CTA	Saltonstall 研制的共混膜
1968	a-PA	美国 Monsanto, Du Pont 公司发现其优异 RO 性能
1969	S-PPO	美国 General Electric 公司开发的废水处理膜
1970	B-9(a-PA)	Du Pont 公司推出的苦咸水脱盐中空纤维膜
1970	CTA	美国 Dow Chemical 公司的脱盐中空纤维膜
1970	PI	美国、德国等开发过聚酰亚胺 RO 膜
1971	PBI	美国 Celanese Research 公司开发的耐热膜
	PSA	前苏联、中国等开发过聚砜酰胺 RO 膜
1972	S-PS	法国 Phone-poulence, S. A 公司开发的耐热膜
1972	聚哌嗪酰胺	意大利 Credali 开发的耐氯膜
1973	B-10(a-PA)	Du Pont 公司推出的海水脱盐中空纤维膜

由上可以看出对膜材料要求是所成的膜要有高脱盐率和高通量以满足经济脱盐的要求，要有足够的机械强度以保证在所承受的压力下正常工作；另外据实际要求，膜材料还应有良好的化学稳定性，以耐水解、耐清洗剂侵蚀、耐强氧化消毒以及可在苛刻条件下应用；要有耐热性，以便能在较高温度下工作；要耐生物降解，以不会因生物的活动而丧失其优异性能；要耐污染，以可长期保持膜的性能，少清洗，长寿命……

表 25-2 典型复合膜发展概况

年 份	膜 材 料	备 注
1970	NS-100	聚乙烯亚胺与甲苯二异氰酸酯在 PS 支撑膜上形成的复合膜
1972	NS-200	糠醇在酸催化下,在 PS 支撑膜上就地聚合成膜
1975	PA-300	乙二胺改性聚环氧氯丙烷与间苯二甲酰氯界面聚合成膜
1977	NS-300	呱嗍与均苯三甲酰氯和苯二甲酰氯界面聚合成膜
1980	FT-30	间苯二胺与均苯三甲酰氯界面聚合成膜
1980	PEC-100	糠醇和三羟乙基异氰酸酯在酸催化下就地聚合成膜
1983	NTR-7200	PVA 和呱嗍与均苯三甲酰氯界面聚合成膜
	...	
	NTR-7400	S-PES 涂层的 NF 膜
	...	
	UTC-20	与 NS-300 类同
	...	
	UTC-70	均苯三胺与 TMC 和 IPC 界面聚合成膜
	...	
	UTC-80	均苯三胺与 TMC 和 IPC 界面聚合成膜
1985	NF-40	同 NS-300
	...	
	NF-70	同 FT-30,膜更疏松
1986	FT-30SW	同 FT-30,膜表层更加致密
1995	ESPA 等	低压、节能,同 FT-30,膜表层形态不同
1998	LF-型	耐污染,同 FT-30,膜表层亲水、荷电不同

膜材料的选择经历了由实验到认识的不断深化过程,最初是较盲目地大量地直接成膜试验,以后逐步从膜的传递机理,材料的结构和性能与膜性能之间关系等来进行预测。

25.2.1.2 膜组器

反渗透组件是将膜组装成能付诸于实际应用的最小基本单元,是反渗透装置的主要部件。组件可呈不同构型,组件的尺寸可大可小,以适应不同规模的装置要求和不同的应用。反渗透膜组器技术的创新,使膜的性能得以充分的发挥,特别是中空纤维反渗透器和卷式反渗透元件。

1970 年美国 DuPont 公司推出 B-9 型苦咸水脱盐用中空纤维反渗透器,作为重大化工进展而获得 1971 年美国化工学会奖。中空纤维反渗透组器如图 25-1 所示。

目前应用的大型组件的直径为 8~12 英寸。这种组件的优点是内装的中空纤维膜本身能承受操作压力,不需膜的支撑体,中空纤维膜的透水性虽比相同面积的片状膜差,但中空纤维膜填充密度最高,单位体积的产水量还是最高,而且结构最紧凑,是目前最广泛采用的组件之一,特别在海水淡化方面应用最多。其缺点是纤维排列较密,易于堵塞,进水水质要求最高。

同样地,自 1964 年提出卷式元件概念,经十多年的多次更新换代,卷式元件也于 20 世纪 70 年代中商品化,其构思是数个膜对绕中心多孔产品水管卷起来,呈筒状,其中,膜对是由两张膜(脱盐层向外)和置于中间的产水流道布组成,除靠中心多孔产品水管的一边外,其他三边都用胶黏剂密封;使用时,将其放入压力容器中,

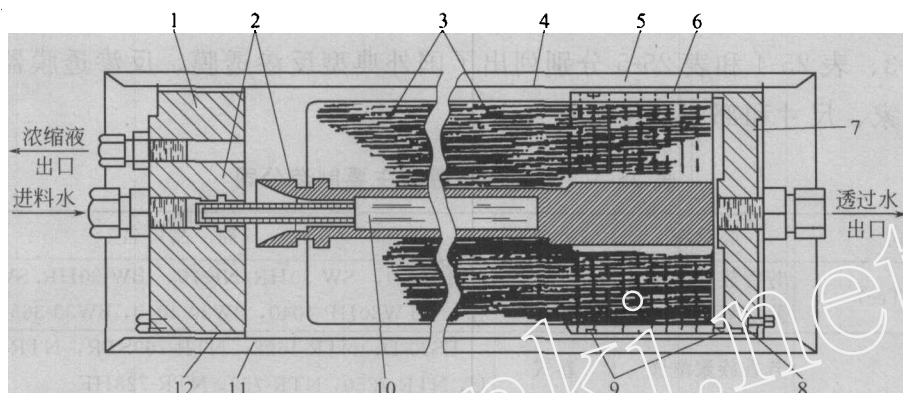


图 25-1 中空纤维组器

1, 7—端板；2, 9, 12—O 形圈；3—中空纤维束；4—聚酯包装；5—管板；
6—环氧树脂固封；8—挡圈；10—布水孔；11—外壳

这一构型使膜片的使用和生产（特别是复合膜）得以急剧扩展，卷式反渗透元件结构如图 25-2 所示。现在工程实际中多用直径为 4 英寸或 8 英寸，长为 40 英寸或 60 英寸的元件，它们分别由约 5 叶和 20 叶膜对螺旋状卷制而成。

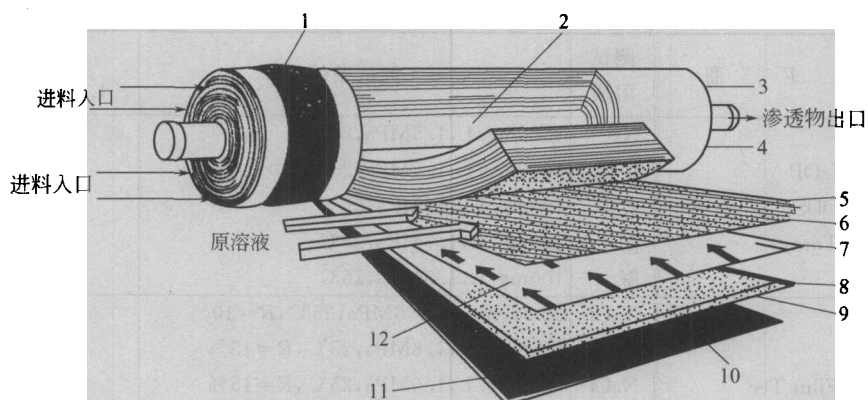


图 25-2 卷式反渗透元件

1—端部；2—中心产水管；3, 4—进料出口；5, 9—进料流道网；
6, 8—膜；7—产水导流布；10, 11—膜对；12—产水

目前国外反渗透膜、反渗透膜器件领先的有以下国家的厂商。

美国：①陶氏（Dow Chemical），最先推出 FT-30 反渗透复合膜，现有多品种膜；②柯氏（Koch），有最大型反渗透复合膜组件（ $\phi 18$ 英寸，60 英寸长）；③海德能（Hydronautics）也有多品种反渗透复合膜组件；④GE（Osmonics）也有多品种反渗透复合膜组件；⑤Trisep 也有多品种反渗透复合膜组件。另：Du Pont 公司海水脱盐中空纤维膜组件（现停产）。

日本：①日东电工，有多品种反渗透复合膜组件；②东丽，有多品种反渗透复合膜组件，有耐高压膜组件；③东洋纺，有多品种 CTA 中空纤维膜组件。

韩国：世韩，有多品种反渗透复合膜组件。

表 25-3、表 25-4 和表 25-5 分别列出了国外典型反渗透膜、反渗透膜器件的性能（含某些厂家、尺寸和部分操作参数）。

表 25-3 国外反渗透膜主要制造公司

公 司	膜材料	类型	商 品 名
Dow(Film Tec)	芳香族聚酰胺 薄层复合膜	卷式 卷式	BW-30, SW-30HR/NF-70, BW-30HR/SW-30, TW30-4040, TW30HP-4040, BW30-4040, BW30-365
日东电工	芳香族聚酰胺	卷式	ES20-D, NTR-1698, NTR-7695TR, NTR-7450, ES20-U, NTR-7250, NTR-759, NTR-728HF
Hdronautics	芳香族聚酰胺	卷式	UHY-ESPA, LHY-CPA3, LHY-CPA4, HSY-SWC2, HHY-SWC1, ESPA-FREE3500
Fluidsystem/Anglian Water	芳香族聚酰胺 醋酸纤维素	卷式 卷式	TFCL, TFCL-HP, TFC3, TFCS ROGA
日本东丽	芳香族聚酰胺 交联聚醚	卷式 卷式	SU-700, SU-800, SU-900 SC-100, SC-3000
Du Pont	芳香族聚酰胺	中空式	Permasep B-9, B-10
日东本洋纺	醋酸纤维素	中空式	HR8355, HA8130, HA5110

表 25-4 反渗透膜的特性

膜材料	厂 商	测试 溶质	测试条件	通量 /[L/(m ² ·h)]	脱除率 /%
CA	UOP DDS Toray	NaCl	1500mg/L, 1.5MPa, 25℃	12.5	96
		甲醇	1000mg/L, 1.5MPa, 25℃	12	55
		乙醇	100mg/L, 1.7MPa, 25℃	12	510
		酚	100mg/L, 1.7MPa, 25℃	12	50
		脲	100mg/L, 1.5MPa, 25℃	12	5526
		脲	100mg/L, 1.5MPa, 25℃	12	5526
交联芳香族聚 酰胺	Film Tec Fluid Systems Hydranautics Toray Trisep	NaCl	35 000mg/L, 5.5MPa, 25℃, R=10%	20.6	99.5
			2000mg/L, 1.6MPa, 25℃, R=15%	38.2	98.0
			2000mg/L, 1.6MPa, 25℃, R=15%	61.6	99.2
		NaCl	1500mg/L, 1.6MPa, 25℃, R=15%	53.0	>99.0
			2000mg/L, 1.6MPa, 25℃	—	25.0
			2000mg/L, 1.6MPa, 25℃	—	70.0
		脲	2000mg/L, 1.6MPa, 25℃	—	70.0
		酚	51mg/L, 2.1MPa, pH=7.4, R=83%	—	90.0
			85mg/L, 2.1MPa, pH=11.4, R=39%	—	99.0
		酚	85mg/L, 2.1MPa, pH=11.4, R=39%	—	99.0
PA-300(聚醚 酰胺)	UOP	NaCl	35 000mg/L, 6.9MPa	34.0	99.4
		乙醇	700mg/L, 6.9MPa, 25℃	34.0	90
		脲	1250mg/L, 6.9MPa, 25℃	34.0	80~85
		酚	100mg/L, 6.9MPa, 25℃, pH=4.9	34.0	93
			100mg/L, 6.9MPa, 25℃, pH=12	34.0	>99
		酚	100mg/L, 6.9MPa, 25℃, pH=12	34.0	>99
PEC-1000(聚 呋喃醇)	Toray	NaCl	35 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	14.6	99.9
		甲醇	55 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	15.8	41
		乙醇	60 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	9.6	97
		脲	10 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	23.2	85
		酚	10 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	10.0	99.0
			10 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	10.0	99.0

注：仅列出四种典型膜的分离特性。

表 25-5 东洋纺部分中空纤维组件规格和性能

产品型号	高脱盐型			高通量型		低压型	
组件编号	HR5155	HR8355	HM9255	HA5230	HA8130	HA3110	HA5110
组件数目	1	1	2	1	1	1	1
组件直径/cm	153	305	360	150	295	90	140
组件长度/cm	444	1300	1665	840	1320	420	420
组件重/kg	13	125	310	21	100	4	11
连接螺母	进水	PT ^{1/2}	PT ^{3/4}	PT ^{1/2}	PT ^{3/4}	PT ^{2/8}	PT ^{1/2}
	产水	PT ^{1/2}	PT ^{3/4}	PT ^{1/2}	PT ^{3/4}	PT ^{3/8}	PT ^{1/2}
	浓水	PT ^{3/8}	PT ^{3/4}	PT ^{3/8}	PT ^{3/4}	PT ^{1/4}	PT ^{3/8}
进水浓度/(mg/L)	3500			1500		500	
进水压力/MPa	5.5			3.0		1.0	
进水温度/℃	25			25		25	
进水回收率/%	30			75		30	
产水量/(m ³ /d)	1.2	1.2	35	15	60	0.9	2.5
脱盐率/%	99.4	99.4	99.4	94	94	94	94
压力范围/MPa	<6.0	<6.0	<7.0	<4.0	<1.5	<1.5	
温度范围/℃	5~40			3~8		5~35	
浓水流速范围/(m ³ /d)	2~10	15~150	50~150	7.5~60	25~150	1~4	3~12
进水 SDI	4.0			4.0		4.0	
进水 pH 值	3~8			3~8		3~8	
进水余氯/(mg/L)	0.2~1.0			0.2~1.0		0.2~1.0	

国内目前反渗透膜、反渗透膜器件的领先厂商:

- ① 杭州水处理技术研究开发中心的北斗星公司;
- ② 贵州汇通源泉环境科技有限公司。

表 25-6 列出了国内典型反渗透膜器件的性能。

表 25-6 国产反渗透膜器件性能

膜材料	组件	厂商	组件规格	溶质	测试条件	产量 (m ³ /d)	脱除率 /%
CTA	中空纤维	杭州水中心	φ220×1300 (HRC-220)	NaCl	100mg/L, 1.5MPa, 25℃, R=60%	>30	>90
芳族聚酰胺	卷式	杭州水中心	φ100×1016 (BDX-4040S) φ200×1016 (BDX-8040S)	NaCl	32 000mg/L, 5.5MPa, 25℃, R=8%	5.5~7.0 20~32	99.2~99.5 99.2~99.5
CA-CTA	卷式	8271 厂	φ200×1000 C8040FF	NaCl	1000mg/L, 2.8MPa, 25℃	23~28	≥95
			C8040GF	NaCl	1000mg/L, 1.8MPa, 25℃	25~27	≥90
芳族聚酰胺	卷式	8271 厂	8040(复合膜)	NaCl	1000mg/L, 1.4MPa, 25℃	27	97
芳族聚酰胺	卷式	汇通公司	φ100×1016 (SW11-4040) φ200×1016 (SW11-8040)	NaCl	32 800mg/L, 5.5MPa, 25℃, R=8%	5.3 22.7	99.2 99.2

国外厂商在国内市场份额:

①陶氏 (Dow Chemical), 占 35%; ②海德能 (Hydronautics), 占 35%; ③世韩, 占 10%; ④柯氏 (Koch), 占 10%; ⑤GE (Osmonics), 少量; ⑥东丽, 少量; ⑦Trisep, 少量。

国内厂商目前市场份额很小, 主要问题在于国产膜元件有待工程考验。

25.2.2 关键设备

与此同时, 反渗透海水淡化用的关键设备, 如高压泵和能量回收装置也得到快速的发展。除高压泵的品种和型号不断增多、容量不断增大、效率不断提高之外, 特别应提及的是能量回收装置, 反渗透海水淡化所以能成为有竞争力的过程, 能量回收装置的作用功不可没。

第一代能量回收装置是与高压泵电机主轴相连的涡轮机, 用脱盐后的高压浓海水冲击来回收能量, 效率约 60%; 第二代产品是水力涡轮增压器, 其优点是不必与泵的主轴相连, 安装方便, 效率也在 60% 左右; 第三代产品为功或压力交换器, 直接将压力由浓海水传给新进的海水, 效率大于 90%, 这样反渗透海水淡化的本体耗电降到 $3\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以上。目前能量回收装置领先厂商有水力涡轮增压器 (hydraulic turbo charger), 美国 Pump Engineering Company 生产; 压力交换器 (pressure exchanger), 美国 Energy Recovery Incorporation 生产。高压泵目前国产的有杭州南方特种泵厂、杭州中杭泵业有限公司、沈阳、大连、宝鸡水泵厂等的产品; 进口的有 Osmonics、Grundfos、DP-Pump 和 Union Pump 等公司的产品。对反渗透海水淡化, 目前工程所用的高压泵和能量回收装置都是进口。

25.2.3 工艺过程

随反渗透膜和组器技术的进步, SWRO 工艺也不断地发展, 主要工艺过程如下。

(1) 二级海水淡化工艺

20 世纪 70 年代商用反渗透膜的脱盐率仅在 95%~98% 时, 为了从海水中制取饮用水而采用此工艺, 第一级的产水 (约 2000mg/L) 再经第二级进一步淡化为饮用水, 第二级的浓水返回第一级作为部分进水, 显然该过程能耗是高的, 约 $10\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以上。

(2) 一级海水淡化工艺

20 世纪 70 年代末, 特别是 80 年代中期以后, 反渗透膜的脱盐率达 99.2% 以上, 这为一级 SWRO 创造了条件。海水经一级反渗透后, 产水即为饮用水 (300~400mg/L), 水回收率 30%~35%。

(3) 高压一级海水淡化工艺

这是近年来, 为了进一步提高回收率而提出的新工艺之一。通常一级 SWRO 的操作压力在 5.5MPa, 而若提高到 8.4MPa 下操作, 则可达 60% 的回收率, 这样海水

预处理省了, 试剂用量少了。

(4) 高效两段法

这也是提高回收率的新工艺, 这是一级两段工艺的改进, 在两段间设增压部分, 第一段的浓海水经增压和最终的能量回收部分相结合进入第二段, 这也可使回收率达 60%。该工艺不仅适合于新建的 SWRO 厂, 且可将以前的一级 SWRO 厂增设第二段, 使其产量增加一半。表 25-7 列出了目前我国反渗透海水淡化工程情况。

表 25-7 我国反渗透海水淡化工程情况 (百吨级以上)

项 目	日产量/(t/d)	承 担 单 位	完成时间
嵊山海水淡化装置	500	杭州水处理技术开发中心	1997 年
马迹山海水淡化装置	350	杭州水中心/美国 UAT 公司	1999 年
长海海水淡化装置	1000	广西玉柴德国 Prominent 公司	1999 年
	500		2002 年
基里巴斯海水淡化装置	2×50	杭州水处理技术开发中心	1999 年
獐子岛海水淡化装置	500	德国 Prominent 公司	2000 年
长岛海水淡化装置	1000	杭州水处理技术开发中心	2000 年
	1000	杭州水处理技术开发中心	2000 年
嵊泗海水淡化装置	600	德国 Prominent 公司	2002 年
	1000	杭州水处理技术开发中心	2004 年
沧州化工亚海水淡化工程	18 000	广西玉柴	2000 年
威海华能海水淡化装置	2000	半岛水处理有限公司	2001 年
大连华能海水淡化装置	2000	半岛水处理有限公司	2001 年
崧嵛岛海水淡化装置	500	美国 H&W 国际贸易公司	2002 年
小钦岛海水淡化装置	75	杭州水处理技术开发中心	2002 年
北隍城海水淡化装置	75	杭州水处理技术开发中心	2002 年
巴基斯坦海水淡化装置	500	天津淡化所	2003 年
棉花岛海水淡化装置	100	杭州水处理技术开发中心	2003 年
石岛海水淡化工程	5000(一期)	杭州水处理技术开发中心	2003 年
大连石化海水淡化装置	5000	绿色源泉	2003 年
台湾海水淡化装置	2×250	杭州水处理技术开发中心	2003 年

国内反渗透海水淡化工程领先厂商有: ①杭州水处理技术研究开发中心的西斗门公司 (千吨~万吨/天的反渗透海水淡化示范和工程); ②半岛水处理公司 (千吨/天的反渗透海水淡化工程)。

25.3 膜法海水淡化领域的产业化进展

25.3.1 国外膜法海水淡化技术及产业发展现状

海水淡化技术经过半个多世纪的发展, 从技术上讲, 已经比较成熟, 大规模地把海水变成淡水, 已遍布世界各地。目前主要海水淡化方法有多级闪蒸 (MSF)、反渗透 (SWRO)、多效蒸发 (MED) 和压汽蒸馏 (VC) 等, 而适用于大型的海水淡化

的方法只有 SWRO、MSF 和 MED，最大的 MSF 淡化厂规模达 30 多万立方米/天，最大的 SWRO 淡化厂规模为 17 万立方米/天。全世界淡化水日产量约 3300 万立方米，MSF 和 RO 各占 43.5%，解决了 1 亿多人口（约占世界人口的 1/40）的供水问题。近 30 年内淡化成本降低了约 2/3，淡化水成本在 0.5 美元/吨左右。世界海水淡化工程额每年约 50~100 多亿美元。

进入 21 世纪后，由于反渗透海水淡化技术发展迅速，制水成本大幅下降，其装机容量超过了所有蒸馏法的装置数，这表明海水淡化已进入以反渗透为主的时代。图 25-3 为 1991~2001 年间全球和海湾地区采用不同淡化方法所建设的海水淡化装置产水量比较。

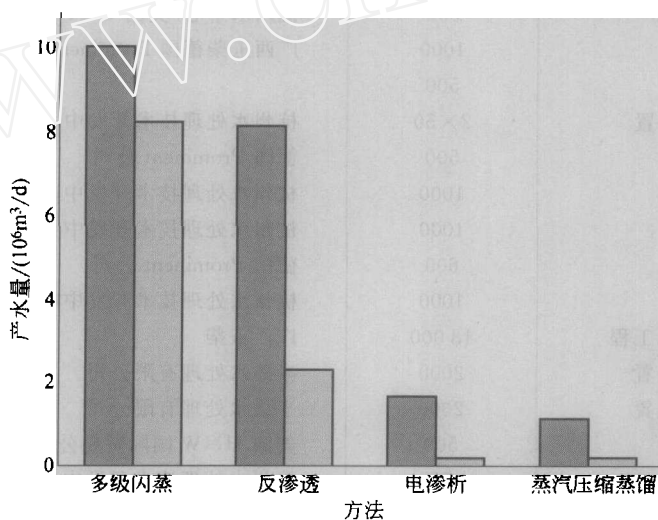


图 25-3 1991~2001 年间不同方法建设的海水淡化产水量比较

■ 全球；□ 海湾地区

全球海水淡化市场已颇具规模。据国际脱盐协会公布，截止 2001 年止，世界上日产 100 立方米以上的海水淡化装置已达 15 233 座，总产水能力 3240m³/d，如图 25-4 所示。海水淡化已解决了世界上 1 亿多人口的饮用水问题。

从国外发展趋势分析，海水淡化已成为新世纪解决淡水资源危机的战略选择。世界海水淡化权威组织国际脱盐协会会长曼索尔说：“海水淡化已经成为全世界淡水生产的重要组成部分，海水淡化的普及和发展是人类解决水资源问题的必然趋势。”在 2000 年科威特海水淡化国际会议上，有关专家指出，如果按照过去 20 年的增长需要，至 2025 年，海水淡化总装置容量将达到 1.19 亿立方米/天。未来 20 年，市场价值预期达 700 亿美元以上，全球市场潜力巨大。

目前国际海水淡化技术发展趋势主要有以下几方面。

① 海水淡化已进入以反渗透法为主的时代。这主要归功于反渗透海水淡化成本低，目前每生产 1t 淡水耗电：多级闪蒸为 8~10 度、多效蒸发为 6~8 度、反渗透为 3.5~4.5 度。

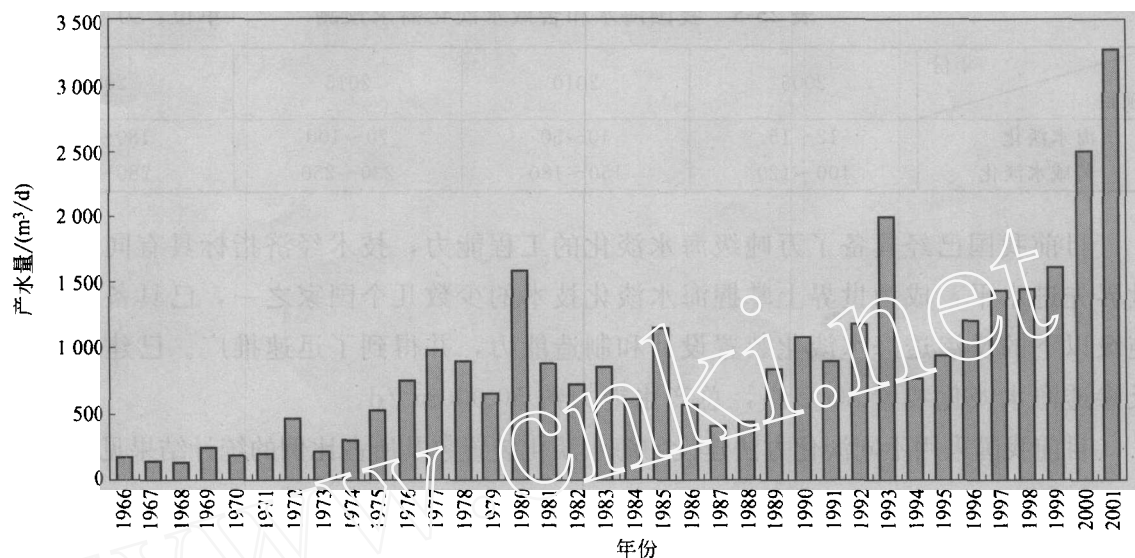


图 25-4 世界上不同年份建造的脱盐装置产水量统计图

② 海水淡化装置大型化。目前最大的反渗透海水淡化厂建在以色列，日产淡水 33 万立方米；最大的反渗透苦咸水淡化厂建在美国，日产淡水 38 万立方米。

③ 高效节能化。主要集中在高性能膜、大口径膜组器、高能量回收系统和高效海水预处理等技术开发。

④ 装置个性化，主要是针对不同环境和不同用途，采用不同能源开发个性化海水淡化装置。如船用式、车载式海水淡化装置，风能和太阳能海水淡化装置。

25.3.2 我国膜法海水淡化技术产业发展现状和发展趋势前景

我国的海水淡化的研究起步较早，1958 年开始电渗析（ED）的研究，1965 年开始反渗透（RO）和蒸馏等的研究。

在电渗析研究方面，1967 年实现了苯乙烯-二乙烯苯型异相离子交换膜的工业化生产，20 世纪 70 年代以来，相继进行了多种均相离子交换膜的研制和中试放大，电极动力学研究和新型钛涂钨电极的制备，大尺寸（800mm×1600mm）ED 用隔板的开发，ED 水力学参数研究，大型 ED 膜堆的设计和开发，频繁倒极电渗析（EDR）技术和工艺的开发等，使我国 ED 的工艺水平接近世界先进水平，1980 年在西沙建成 200m³/d 的 ED 海水淡化站，满足了当时的军用和民用的需求，能耗约为 18kW·h/m³ 淡水。

在反渗透方面，1967~1969 年全国海水淡化会战为醋酸纤维素不对称反渗透膜的开发打下基础，70 年代进行了中空纤维和卷式 RO 元件的研究开发，80 年代初步产业化并推广应用；现在与引进相结合，进行复合反渗透的研究开发和规模化生产，性能接近海水淡化要求。1997 年在舟山嵊山岛建成 500m³/d 的海水 RO 淡化站，至今已建 10 多处 SWRO 淡化站，能耗约为 4kW·h/m³ 淡水，总产淡水约 30 000m³/d。未来我国海水和苦咸水淡化需求预测参见表 25-8。

表 25-8 我国海水和苦咸水淡化需求预测 (单位: 万吨/日)

项目\年份	2005	2010	2015	2020
海水淡化	12~15	40~50	70~100	180~200
苦咸水淡化	100~120	150~180	230~250	280~300

目前我国已经具备了万吨级海水淡化的工程能力, 技术经济指标具有同等容量的世界先进水平, 成为世界上掌握海水淡化技术的少数几个国家之一, 已具备了日产万吨级以下的反渗透海水淡化装置设计和制造能力, 并得到了迅速推广。已建成投产的反渗透海水淡化装置 20 多座, 总产水能力约 50 000m³/d。

目前我国采用不同淡化方法建设的海水淡化装置数及所占比例的统计结果见图 25-5。

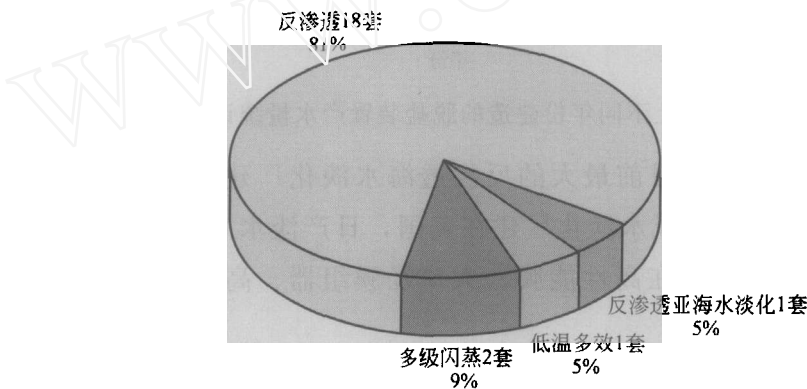


图 25-5 我国不同淡化方法建设的海水淡化装置数及所占比例

采用不同淡化方法建设的海水淡化装置产水量及所占比例的统计结果见图 25-6。

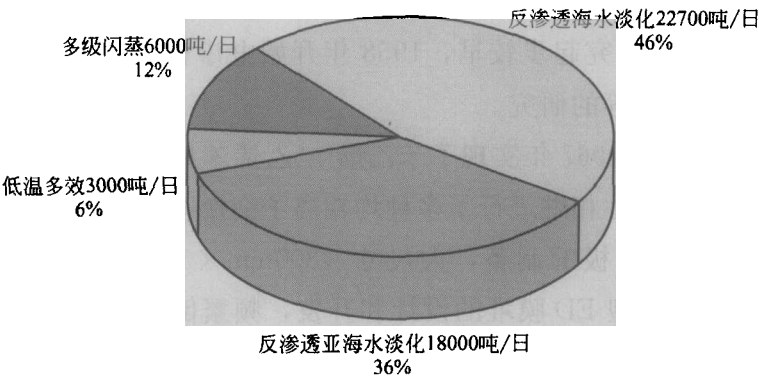


图 25-6 我国不同淡化方法建设的海水淡化装置产水量 (吨/日) 及所占比例

我国各地区已建的海水及亚海水淡化装置数及所占比例的统计结果见图 25-7。

各地区在建和拟建的海水淡化项目产水量的统计结果见图 25-8。

浙江省在建和拟建海水淡化项目的产水量的统计及预测结果见图 25-9。

海水淡化技术涉及新材料、化工、环境和信息等领域, 它的发展必将带动这些领域的进步; 海水淡化是极具有发展潜力的新兴产业, 能形成新增长点, 促进经济更大的发展。目前我国海水淡化的市场约 40 亿元人民币。各公司在其中所占的份额和比例参见图 25-

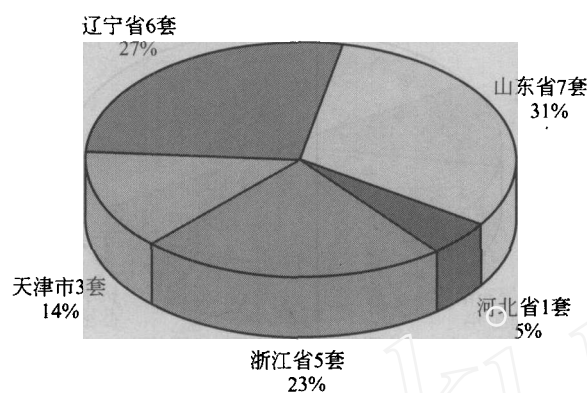


图 25-7 我国各省已建设的海水及亚海水淡化装置数及所占比例

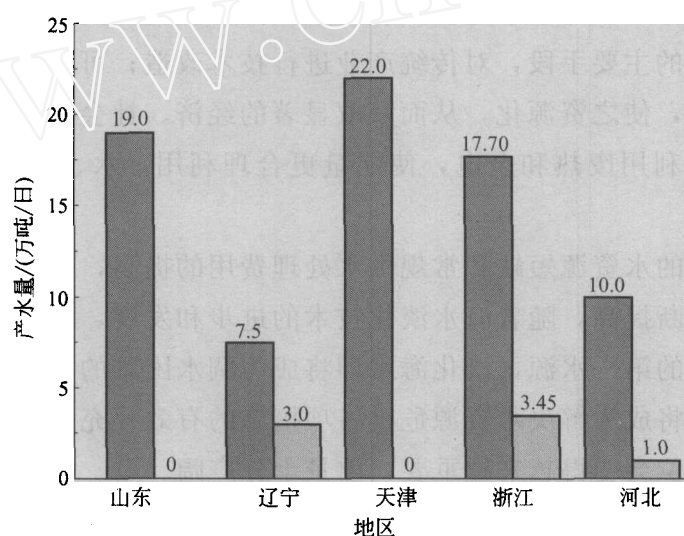


图 25-8 我国各省市在建及拟建海水及亚海水淡化项目产水量

■ 拟建；▣ 在建

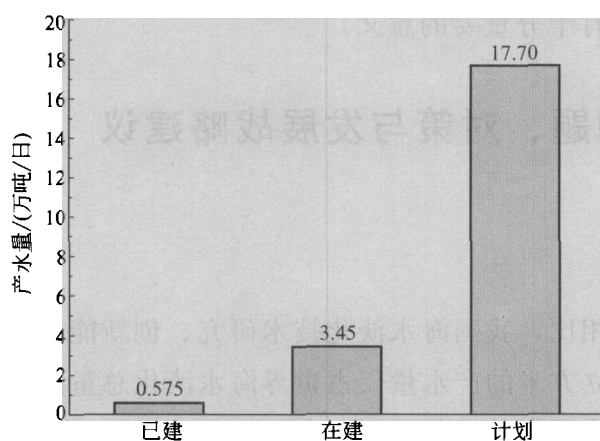


图 25-9 浙江省海水淡化发展趋势

10. 我国海水淡化产业的快速发展，可使我国在该技术的竞争中占据有利位置。

海水淡化技术也是一共性技术，它的延伸在电子、电力、生物工程、医药（疗）、化工和环保等领域也发挥了重大作用，促进了这些领域的技术革新和进步，实现协

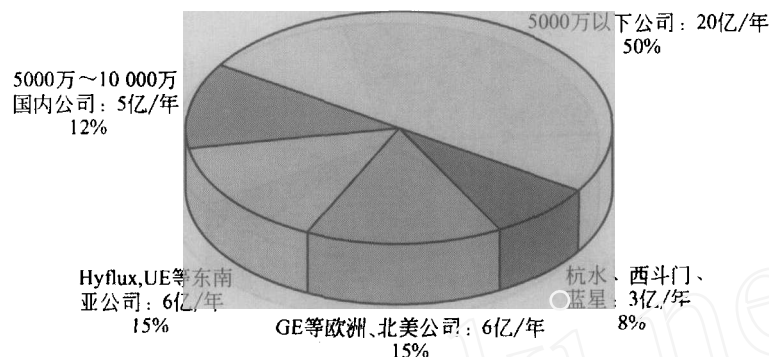


图 25-10 各公司在国内海水淡化与水再利用市场中所占的份额

调、可持续的发展。可去除水中危害人体健康成分，提高人民生活质量；可以此技术作为提升传统产业的主要手段，对传统产业进行技术改造；可实行清洁生产，并对污水等进行深度处理，使之资源化，从而获取显著的经济、社会和生态效益回报。

该技术可综合利用废热和余电，使能量更合理利用，水、电和热的成本进一步降低。

随着日益严重的水资源短缺和常规供水处理费用的提高，随着经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高，随着海水淡化技术的进步和发展，海水淡化已经成为解决海岛居民生活用水的第一水源，淡化海水即将成为调水困难的沿海城市的重要补充水源和应急水源，也将成为解决水资源危机各项措施的有效补充。其在水资源领域的作用会越来越大，地位会变得越来越重要，前景十分广阔。

因此，发展海水淡化技术，向海洋索取淡水已成为现代社会的当务之急。大力发展海水淡化产业，对缓解当代水资源短缺、供需矛盾日趋突出和环境污染日益严重等系列重大问题具有深远的战略意义。另外，发展海水淡化技术产业对提高国际竞争力，竞争国际市场具有十分重要的意义。

25.4 存在问题、对策与发展战略建议

25.4.1 存在问题

与国外先进水平相比，我国海水淡化技术研究、创新能力以及产业化还在存着很大的差距，每天 5 万立方米的产水量仅占世界海水淡化总量的千分之一。影响我国海水淡化产业发展的技术因素主要有以下三方面。

(1) 大规模海水淡化工程技术尚未开发，影响了规模化应用

目前，我国仅拥有日产万吨级以下的反渗透海水淡化装置及工程技术，单机产量也只在 5000m³/d，按国家人均饮用水标准，日产 10 000 立方米装置只能提供 3.0 万人口的饮用水，尚不能解决区域性和大面积缺水问题。而美国、日本等发达国家已拥有

数十万吨反渗透海水淡化装置及工程技术, 单机产量可达 $10\,000\text{m}^3/\text{d}$ 以上, 日产 10 万立方米的装置可提供 35 万人口的饮用水, 相当于一个县级城市的居民饮用水量。

(2) 品种单一, 系列化程度低, 应用局限性较大

目前, 我国仅拥有固定式的万吨级以下的反渗透海水淡化装置以及工程技术, 品种单一。而美国、日本等国家系列化程度高, 个性化明显, 有固定式、移动式(车载式、船用式)海水淡化装置, 有风能、太阳能海水淡化装置和特种用途的海水淡化装置, 适应性强, 应用领域广, 应用量大。

(3) 大量的关键设备和材料尚未产业化开发, 国产化率低

目前, 反渗透膜组器、压力容器、能量回收装置以及高压泵等反渗透海水淡化用关键设备及材料尚未实施产业化开发, 仍需要从国外进口, 按投资价格比, 国产化率不到 50%。

以上因素已成为制约我国反渗透海水淡化产业规模发展的瓶颈。

25.4.2 对策措施

坚持“统一规划, 分步实施, 全面推进”的原则, 加强膜法等海水淡化技术的创新研究, 搭建海水淡化技术平台建设, 以发展反渗透海水淡化技术等为突破口, 推动海水淡化技术产业的发展, 形成人才梯队, 按“产、学、研结合、多元化投资、项目法人管理”的方式, 实施一批海水淡化关键材料与设备产业化项目, 建立一批日产 5 万立方米以上的海水淡化示范工程, 形成一批产业化基地。

25.4.3 发展战略建议

25.4.3.1 发展思路

大力发展海水淡化关键材料、技术与装备, 突破海水淡化发展的瓶颈, 推动海水淡化装置大型化, 降低成本, 实现大规模应用, 使海水淡化成为解决我国沿海地区水资源匮乏的重要战略选择, 使我国的海水淡化技术和产业跻身国际强国。

25.4.3.2 发展目标

关键材料与设备基本实现国产化, 工程规模大型化。反渗透海水淡化的单机达到 1 万吨/日以上, 设备造价降低 30%, 淡化水成本降低 20%。2010 年海水淡化产水总量达到 80 万~100 万吨/天, 年产值达到 50 亿元, 2020 年达到 200 万~280 万吨/天。使海水淡化成为我国沿海地区供水安全保障体系的重要组成部分, 成为世界海水淡化产业大国。

25.4.3.3 发展重点和内容

- ① 膜法海水淡化专用膜材料, 高性能膜与大型膜组件。
- ② 压力容器, 能量回收装置和高压泵等关键设备。
- ③ 建立日产 5 万吨级反渗透海水淡化示范工程及系统优化, 单机 1 万吨/天。

- ④ 多种个性化新型海水淡化装置生产技术。
- ⑤ 海水冷却技术与大型海水淡化的集成技术。
- ⑥ 蒸馏法与反渗透大型海水淡化集成技术。
- ⑦ 海水淡化专用仪表和检测控制系统和装备。
- ⑧ 海水预处理中消毒、净化、过滤（含超滤/微滤膜）技术及装备。
- ⑨ 海水预处理中高效阻垢剂、分散剂和清洗剂技术。
- ⑩ 浓海水排放与海水化学资源提取集成技术及装备。
- ⑪ 淡化水后处理技术及装备。

25.4.3.4 海水淡化与综合利用技术平台建设

- ① 海水淡化工程技术研究中心。
- ② 海水淡化研究和试验现场。
- ③ 海水淡化技术标准和规范。

参 考 文 献

- 1 钱正英, 张光斗主编. 中国可持续发展水资源战略研究报告集. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- 2 高从增, 陈国华主编. 海水淡化技术与工程手册, 北京: 化学工业出版社, 2004
- 3 时钧, 袁权, 高从增主编. 膜技术手册, 北京: 化学工业出版社, 2001
- 4 Ho Winston W S, Sirkar Kamallesh K. Membrane Handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992
- 5 Sourirajan S, Matsua T. Reverse Osmosis/Ultrafiltration, Principals. Ottawa: NRCC Press, 1985
- 6 Rautenbach R, Albrecht R. Membrane Processes. New York John Wiley Sons, 1989
- 7 Baker R W, Cussler E L. Membrane Separation Systems. NJ: Noyes Data Corporation, 1991
- 8 Parekh B. Reverse Osmosis Technology. New York: Marcel Dekker, 1988
- 9 Shumway S A. Desalination & Water Reuse 1999, 9 (4): 27
- 10 Leither G F. Desalination Water Reuse, 1998, 8 (1): 14
- 11 Leither G F. Desalination Water Reuse, 1998, 7 (4): 50
- 12 Kanal I. Sims G V. Desalination & Water Reuse, 1998, 8 (2): 22
- 13 Yuan Zhou. Richard S J Tol. Desalination, 2004, 164: 225~240
- 14 高从增, 谭永文, 张耀江. 加快我国海水利用技术产业发展及政策研究. 中国高科技产业化研究会海洋分会. 北京: 2000. 11

作者简介

吴礼光 博士, 国家海洋局杭州水处理技术研究开发中心研究员, 研究所所长, 国家海洋局膜及膜过程重点实验室副主任。

近年来, 主要从事膜及膜过程方面的研究工作, 先后主持和承担国家“十五”科技攻关项目、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目、国家自然科学基金(重点)项目、国家自然科学基金项目、浙江省自然科学基金项目及浙江省重点科技项目、国家海洋局青年海洋科学基金项目等有关膜分离方面的研究工作, 发表论文 40 余篇, 其中二篇获浙江省优秀论文 1 等奖, 十多篇被 SCI 和 EI 收录, 合编膜分离方面的著作二部, 申请发明专利二项。

高从堦 研究员，中国工程院院士，国际《Desalination》杂志编委，中国海水淡化和水再利用学会和浙江省膜学会理事长，国家海洋局膜及膜过程重点实验室主任。

从事膜分离研究开发工作 30 多年，先后参加、组织并完成了国家、浙江省和国家海洋局重点项目十多项，包括国家和浙江省“七五”、“八五”科技攻关中“关于不对称复合膜与组器研制”等专题项目，中空纤维膜的研制项目，复合膜用关键材料和成膜机理的国家自然科学基金资助项目，荷电膜及其性能研究的回国留学人员科技活动资助项目，多元合金膜以及纳滤膜的研制和工程技术开发，有机物/有机物分离膜研究的国家自然科学基金重点项目，科技部和工程院海水利用的软课题，国家“863”和“973”的课题等。现主要进行膜与优先吸附、促进传递、反应和催化，膜与（水）资源、环境、污染治理和传统产业改造等方面的工作。获国家科技进步一等奖 1 项，省部级科技进步一、二、三等奖十多项。发表论文和会议报告 200 多篇，合译著作一部，合著著作四部（其中三部为主编之一）。