



电力科技专著出版资金资助项目

# 海水淡化工程设计

阮国岭 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 海水淡化工程设计

阮国岭 主编

---

电力科技专著出版资金资助项目

---



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书结合作者及其团队多年从事海水淡化研究和工程设计的经验,对目前广泛应用的反渗透、低温多效蒸馏等海水淡化主流技术的设计方法,以及工程设计过程中涉及的关键问题进行了详细论述。全书分为八章,主要包括海水淡化技术概况、海水性质及对海水淡化工程的影响、反渗透海水淡化技术、蒸馏海水淡化技术、水电联产、后处理技术、工程共性技术,以及对海水淡化技术发展前景的展望,内容实用、指导性强,有利于读者进行系统性学习。

本书可供海水淡化工程设计人员及电力、市政等行业的技术人员工作使用,也可作为国内水处理企业技术人员和相关专业研究生的学习参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

海水淡化工程设计 / 阮国岭主编. —北京: 中国电力出版社, 2012.6

ISBN 978-7-5123-3128-0

I. ①海… II. ①阮… III. ①海水淡化 IV. ①P747

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 117906 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2013 年 3 月第一版 2013 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 447 千字

印数 0001—3000 册 定价 70.00 元



## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前言

水是基础性的自然资源，也是战略性的经济资源，更是生态系统和环境的控制要素。随着经济社会的发展和人们生活水平的提高，水资源危机正变成人类面临的巨大挑战之一。

解决水资源不足需要开源节流并举，在遏制水污染的前提下用好存量资源、挖掘增量资源。在解决水资源危机的众多措施中，海水淡化与废水再生利用都属于增量措施，更被认为是实现水资源可持续利用的根本途径。与其他方式相比，海水淡化的优势显而易见，包括：①变废为宝，增加淡水资源总量，且不受季节和气候的影响；②随着技术的不断进步，其产水的质量还会提高，成本仍可下降，发展空间大；③在得到淡水的同时，有助于源水区的生态环境改善，对环境的负面影响可能会小于远距离调水。由于这些优势，近 20 年来海水淡化技术在全球有了快速发展。目前全球日产淡化水（国际淡化协会 IDA）6700 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ，有 2 亿多的人口受惠于海水淡化技术，其使用的国家和地区既包括中东的产油国家，也包括西班牙、以色列、澳大利亚这样的发达国家。进入 21 世纪以来，其增长速度更是居高不下，应用领域不断扩大，正在成为沿海国家和地区应对水资源危机的主要措施。

尽管海水淡化技术已经取得了长足的进步，但其面临的挑战仍然很多。首先，海水淡化是一种以能源换取水资源的技术，能源消耗是社会普遍关注的问题；其次，海水淡化的取水和浓盐水排放会对海洋环境产生一定的影响，尤其是内陆苦咸水淡化的浓水排放是必须解决的问题，迫切需要废水零排放的淡化技术；再者，就现在的技术水平而言，海水淡化的成本还偏高，需要进一步降低成本。因此，海水淡化近年来成为各国的研发热点，许多国家相继出台专项计划，旨在促进学科交叉，用技术创新推动这项事业的发展。2008 年美国科学院出版名为《淡化，国家的未来》的研究报告，检讨美国的海水淡化技术政策，以加强海水淡化的研发，使美国回归海水淡化领军者的地位。

我国的海水淡化技术研究起步于 20 世纪 60 年代，进入新世纪得到了快速的发展，已成为完全独立掌握海水淡化技术的少数国家之一。目前全国的海水淡化产水能力已从 10 年前的不足 3 万  $\text{m}^3/\text{d}$  提升到 50 余万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。其进展引起了国际社会和学术机构的普遍关注，国外的相关企业也相继在中国设立机构、开拓市场。然而，我国海水淡化技术与发达国家相比还有一定的差距，主要表现在原始创新不足，关键材料和设备（膜组件、高压泵、能量回收装置等）还相当依赖进口，工程经验不足，领军企业有待培育，大型工程的市场份额有待提高等，这些都是迫切需要解决的问题。

此外，我国的海水淡化在应用层面还存在以下问题：一是其作用被刻意地低估或片面夸大，表现在适合于海水淡化的场合（如海岛）还在花钱引水，而许多论证还不明了的大型海水淡化工程被过早地抛出，让人难以捉摸；二是海水淡化的信息不对称，一方面是有关技术信息被封闭或垄断于少数机构之中，另一方面是社会公众对于准确信息的渴求，这也让海水

淡化在立项和决策时难以下手；三是介绍海水淡化的理论多、实际经验少，因缺乏工程的系统性，所以让人难以对其作出准确的判断。国内已有关于海水淡化的著作多侧重于理论介绍和上下游的关联，缺少针对海水淡化工程设计的专著。

在此背景之下，本书结合作者及其团队多年从事海水淡化研究和工程设计的经验编写。全书共八章，阮国岭担任主编，其中第一章由阮国岭、徐克、苗超、孙靖编写，第二章由张铭、张晓晨、韩旭、李炎编写，第三章由初喜章、王生辉、陈芑、王晓玲、苏立永编写，第四章由赵河立、齐春华、谢春刚、张令品编写，第五章由吕庆春、任建波、邢玉雷编写，第六章由吴水波、葛云红、邵天宝编写，第七章由冯厚军、陆翔、张乾、闫玉莲编写，第八章由阮国岭、杨尚宝编写。本书供海水淡化工程设计人员，电力、市政等行业的技术人员参考，也可作为国内水处理公司技术人员和相关专业研究生的参考书。希望本书的出版能对读者有所裨益，为推进我国的海水淡化技术和产业尽绵薄之力。

华能玉环电厂庞胜林和国投津能北疆发电厂杨锁印分别提供了其 SWRO 和 MED 的工程案例，提高了本书的实用性，特此表示感谢。书中如有不妥之处，恳请读者批评指正。

国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所 阮国岭

2012年10月

# 目录

前言

▶▶ 第一章 海水淡化技术概况 .....	1
第一节 水资源概况 .....	1
第二节 海水淡化技术概况 .....	8
第三节 海水淡化发展现状 .....	21
▶▶ 第二章 海水性质及对海水淡化工程的影响 .....	28
第一节 海水成分 .....	28
第二节 海水的性质 .....	31
第三节 海水水质标准 .....	36
第四节 海水污染情况 .....	38
第五节 海水成分对海水淡化工程的影响 .....	42
第六节 海水淡化工程水质监测 .....	46
第七节 其他淡化原料水 .....	50
▶▶ 第三章 反渗透海水淡化技术 .....	58
第一节 预处理技术 .....	58
第二节 反渗透淡化技术 .....	75
第三节 反渗透海水淡化工程设计 .....	97
第四节 华能玉环电厂工程实例 .....	124
▶▶ 第四章 蒸馏海水淡化技术 .....	130
第一节 低温多效蒸馏 .....	131
第二节 机械压汽蒸馏 (MVC) 装置 .....	182
第三节 多级闪蒸 .....	186
第四节 北疆发电厂 10 万 t/d 低温多效蒸馏海水淡化工程 .....	188
▶▶ 第五章 电水联产 .....	192
第一节 电水联产优势 .....	192
第二节 电水联产热膜耦合淡化技术基础 .....	194
第三节 电水联产技术 .....	200
第四节 热电联产发展动向 .....	204
第五节 电水联产典型流程 .....	205
第六节 电水联产项目实例 .....	207

▶▶ 第六章 后处理技术 .....	210
第一节 海水淡化水特性 .....	210
第二节 后处理必要性 .....	213
第三节 后处理工艺 .....	216
第四节 后处理池设计实例 .....	227
▶▶ 第七章 工程共性技术 .....	231
第一节 取水 .....	231
第二节 药剂 .....	235
第三节 材料 .....	244
第四节 仪表 .....	258
第五节 环境影响评价 .....	264
第六节 项目建设与运营 .....	271
▶▶ 第八章 展望 .....	280
第一节 主流淡化技术 .....	280
第二节 海水淡化新技术 .....	285
第三节 发展前景评述 .....	287
参考文献 .....	289



## 海水淡化技术概况

水资源短缺已成为全球性问题。采用海水淡化技术开辟新的淡水水源，增加淡水总供应量，已逐渐成为世界各国解决“水危机”的一种重要途径。本章首先简要概括了全球和我国水资源的分布情况，随后对各种海水淡化技术（电渗析、反渗透、多级闪蒸、多效蒸馏等）的原理和技术特点进行了阐述，最后总结概括了全球和我国海水淡化的历史、现状和发展趋势。

### 第一节 水资源概况

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基础自然资源，也是生态环境的控制性要素之一。同时，水资源也是一种战略性的经济资源，是一个国家综合国力的有机组成部分。在过去的几十年间，随着全球人口数量的不断增长、城市化进程的不断加快和世界经济的快速发展，水资源短缺已经成为许多国家经济可持续发展的最大障碍。水资源已不再被认为是能够一直满足人类和生态需求、取之不竭的“大自然的恩赐”。

据统计，全世界约有 12 亿人口得不到安全的饮用水，每年有 500 万人因此而丧生，其中近 90% 是不满 5 岁的儿童。联合国教科文组织 2009 年公布的报告指出：到 2030 年，全球半数人口将生活在缺水的环境中，在未来的几十年间全球将有 2400 万到 7 亿人会因缺水而背井离乡。另据报道，全球用水量在 20 世纪增加了 7 倍，其中工业用水量增加了 20 倍。特别是近几十年来，全球用水量每年都以 4%~8% 的速度持续递增，淡水供需矛盾日益突出。

由于供水不足引发的人类对河流的过度开发和利用，已经导致了严峻的生态后果，全球范围内 1/5 的淡水鱼群已经或濒临绝迹，全世界最长的 20 条河流均遭到大坝拦截。同时，世界上的大河正在以令人担忧的速度枯竭断流，例如 20 世纪 90 年代，黄河下游断流日趋严重，几乎年年断流，而且断流时间越来越长，断流的河段也越来越长。1995 年，黄河断流达 153 天；1996 年，断流 136 天；1997 年，断流 226 天。

此外，水资源短缺也成为导致地区局势紧张的一个主要根源。过去 50 年中，由水引发的冲突不下几百起，其中 37 起有暴力性质，21 起演变为军事冲突。印度和巴基斯坦因印度河水分配份额而大打出手；在非洲，一些国家为了抢夺尼罗河水资源的控制权而爆发冲突。随着水资源日益紧缺，世界范围内水资源的争夺战将越演越烈。

美国《财富》杂志指出：“21 世纪的水危机就像 20 世纪的石油危机一样严峻，水资源将



成为一种决定性的国家财富”。联合国有关机构也指出：“水将成为世界上最严重的资源问题”，“缺水将严重制约 21 世纪经济和社会发展，并可能导致国家间的冲突”，“供水不足将成为一个深刻的社会危机，世界上在石油危机之后的下一个危机便是水的危机”。2009 年 1 月，瑞士达沃斯世界经济论坛年会报告警告说，全球正面临“水破产”危机。缺水问题已成为全人类面临的一个严峻挑战。

## 一、世界水资源分布

地球上水资源的总量约为  $1.386 \times 10^9 \text{ km}^3$ ，其中海洋约占 96.5%，覆盖了地球表面积的 71%，淡水仅占地球总水量的 2.53%，而在这有限的淡水资源中，70%是人类难以企及的南北两极冰盖、冰川、冰雪，此外还有一定比例的深层地下淡水资源很难被利用（见表 1-1）。因此，人类目前能够利用的淡水资源相当有限，主要以各种地表水（河流、湖泊、溪流等）和浅层地下水的形式存在，这部分淡水只占全球水资源总量的 0.26%（见图 1-1）。

表 1-1 全球水资源分布情况

水 资 源	分布面积 ( $\text{km}^2$ )	水量 ( $\text{km}^3$ )	占淡水储量比例 (%)	占总水储量比例 (%)
大洋、海、海湾	831 069 000	1 338 000 000	—	96.5
冰盖、冰川、永久雪层	14 946 297	24 064 000	68.7	1.74
地下水	14 534 646	23 400 000	—	1.7
地下淡水	6 539 814	10 530 000	30.1	0.76
地下咸水	7 994 832	12 870 000	—	0.94
土壤水分	10 250	16 500	0.05	0.001
地下冰、永冻土	186 330	300 000	0.86	0.022
湖泊	109 566	176 400	—	0.013
淡水湖	56 518	91 000	0.26	0.007
咸水湖	53 049	85 400	—	0.006
大气水	8013	12 900	0.04	0.001
沼泽水	7125	11 470	0.03	0.000 8
河流	1318	2120	0.006	0.000 2
生物质水	696	1120	0.003	0.000 1
总量	860 842 500	1 386 000 000	—	100

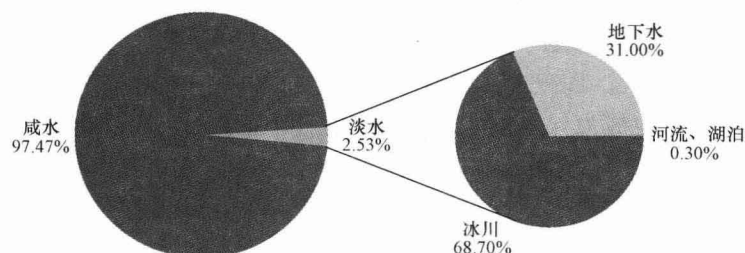


图 1-1 地球水资源分布图

全球淡水资源不仅短缺，而且空间分布极不平衡。欧洲和亚洲集中了世界上 77% 的人口，仅拥有世界河流径流量的 38%；南美人口占全球人口的 5%，却拥有世界河流径流量的 25%。表 1-2 给出了世界各国淡水资源的分布数据，可以看出，世界各国的差异较大，北非和中东各国的人均占有量偏低，美洲国家相对较高。

表 1-2 世界各国淡水资源 (m<sup>3</sup>/a)

国 家	总量 (km <sup>3</sup> /a)	人均值 (2000 年)	人均值 (2025 年低)	人均值 (2025 年中)	人均值 (2025 年高)
科威特	0	0	0	0	0
沙特	2	118	63	59	56
约旦	1	142	87	81	76
利比亚	1	151	107	100	95
也门	4	223	89	85	82
阿曼	1	394	196	185	177
突尼斯	4	412	348	316	291
以色列	3	464	354	330	310
阿尔及利亚	14	472	361	335	313
布隆迪	4	566	303	291	281
卢旺达	6	828	509	489	471
肯尼亚	30	985	739	673	624
摩洛哥	30	1004	779	714	665
埃及	69	1009	789	723	666
丹麦	6	1116	1133	1107	1083
津巴布韦	14	1117	820	755	700
南非	50	1154	1251	1142	1052
黎巴嫩	5	1373	1117	1048	992
海地	12	1486	1114	1048	989
朝鲜	70	1493	1378	1341	1307
捷克	16	1558	1675	1645	1617
比利时	16	1561	1602	1568	1535
波兰	63	1632	1728	1691	1656
马拉维	19	1645	1022	952	907
布基纳法索	20	1690	808	773	745
埃塞俄比亚	110	1749	1020	970	932
索马里	16	1789	778	741	714
巴基斯坦	255	1805	1063	1016	973
伊朗	129	1827	1400	1293	1206
印度	1908	1891	1511	1411	1323

续表

国 家	总量 ( $\text{km}^3/\text{a}$ )	人均值 (2000年)	人均值 (2025年低)	人均值 (2025年中)	人均值 (2025年高)
德国	178	2170	2299	2256	2215
美国	2478	8749	7439	7145	6775
保加利亚	18	2290	3027	2971	2917
厄立特力亚	9	2405	1302	1246	1196
尼日利亚	280	2459	1454	1380	1312
英国	147	2474	2456	2400	2346
多米尼柯	21	2508	2057	1922	1805
坦桑尼亚	89	2534	1592	1474	1377
莱索托	5	2556	2486	2337	2203
斯里兰卡	50	2642	2370	2219	2084
多哥	12	2651	1524	1460	1402
摩尔多瓦	12	2724	3010	2887	2776
加纳	53	2756	1852	1720	1609
叙利亚	45	2761	1754	1631	1524
亚米尼亚	11	2799	2916	2837	2791
西班牙	112	2809	3049	2998	2950
乌克兰	140	2816	3603	3528	3458
萨尔瓦多	18	2819	2120	1972	1842
乌干达	66	2833	1294	1228	1179
法国	170	2870	2783	2709	2642
阿富汗	65	2986	1507	1438	1382
尼日尔	33	3000	1326	1263	1216
中国	2830	2206	2028	1912	1823

注 表中 2025 年人口数量的预测来自联合国人口署发布的《世界人口状况报告》(2000 年版), 人均值分别按低、中、高三个预测人口数量计算得到。

相关统计结果表明, 近几十年来, 各大洲的人均水资源占有量均呈下降趋势, 而且严重缺水地区的面积在不断扩大。20 世纪 80 年代, 严重缺水地区主要集中在北非、中东一些国家; 到 2000 年时, 人均占有水资源量不足  $1000\text{m}^3$  的地区已经扩大到亚洲部分地区; 预计到 2015 年, 除了美洲和大洋洲少数区域外, 全球大部分国家和地区均将处于缺水状态。

## 二、我国水资源分布

我国的淡水资源总量约为  $2830\text{km}^3$ , 占全球水资源的 6%, 仅次于巴西、俄罗斯和加拿大, 名列世界第四位。但是, 我国目前的人均水资源量只有  $2200\text{m}^3$ , 仅为世界平均水平的 1/4, 在世界银行统计的 153 个国家中排在第 88 位, 是全球人均水资源最贫乏的国家之一。同时, 我国也是世界上用水量最多的国家之一, 而且呈逐年上升趋势。表 1-3 列出了我国历年用水量数据, 2002 年, 全国淡水取用量为 5497 亿  $\text{m}^3$ , 大约占全世界年取用量的 13%。2008 年,

我国的取水量达到了 5910 亿  $m^3$ 。

表 1-3 我国历年用水量数据

年 份	农业和农村生活		工 业		城市生活		总计 (亿 $m^3$ )	人均用水量 ( $m^3$ )
	用水量 (亿 $m^3$ )	所占比例 (%)	用水量 (亿 $m^3$ )	所占比例 (%)	用水量 (亿 $m^3$ )	所占比例 (%)		
1949	1001	97.1	24	2.3	6	0.6	1031	187
1959	1938	94.6	96	4.7	14	0.7	2048	316
1965	2545	92.7	181	6.6	18	0.7	2744	378
1980	3912	88.2	457	10.3	68	1.5	4437	450
1993	4055	78.0	906	17.4	237	4.6	5198	445
1997	4198	75.3	1121	20.2	247	4.5	5566	458
2001	3841	68.9	1141	20.5	601	10.8	5567	436
2002	3738	68.0	1143	20.8	616	11.2	5497	428
2003	3431	64.5	1176	22.1	633	11.9	5320	412
2004	3584	64.6	1232	22.2	649	11.7	5548	427
2005	3583	63.6	1284	22.8	676	12.0	5633	432
2006	3662	63.2	1344	23.2	695	12.0	5795	442
2007	3602	61.9	1402	24.1	710	12.2	5819	442
2008	3664	62.0	1401	23.7	727	12.3	5910	446

以下为我国水资源的特点。

#### (一) 总量丰富，分布不均

我国水资源总量虽多，但地区分布很不平衡，呈现南多北少，与人口、耕地、矿产和经济的分布不相匹配的格局。长江流域及其以南地区，国土面积只占全国的 36.5%，人口占全国的 54%，其水资源量占全国的 81%；长江以北地区，国土面积占全国的 63.5%，人口占 46%，其水资源量仅占全国的 19%。

人均水资源低于  $3000m^3$  为轻度缺水；低于  $2000m^3$  为中度缺水；低于  $1000m^3$  为严重缺水；低于  $500m^3$  为极度缺水； $300m^3$  为维持适当人口生存的最低标准。按照这一标准，我国目前有十多个省（区、市）人均水资源量（不包括过境水）低于严重缺水线，有 6 个省、区（宁夏、河北、山东、河南、山西、江苏）人均水资源量低于  $500m^3$ ，大连、天津、青岛、烟台人均水资源占有量都在  $200m^3$  以下。

表 1-4 给出了全国各流域降水、地表和地下水分布情况。图 1-2 为我国各省、直辖市人均水资源占有量及多年平均降雨量。

表 1-4 全国各流域降水、地表和地下水分布情况

流 域	计算面积 ( $km^2$ )	降 水 情 况		径流总量 (亿 $m^3$ )	地下水量 (亿 $m^3$ )	水资源量 (亿 $m^3$ )
		降水深度 (mm)	降水量 (亿 $m^3$ )			
黑龙江	903 418	496	4476	1166	431	1352
辽河及其他河流	345 027	551	1901	487	194	577
海河、滦河	318 161	560	1781	288	265	421

续表

流域	计算面积 (km <sup>2</sup> )	降水情况		径流总量 (亿 m <sup>3</sup> )	地下水量 (亿 m <sup>3</sup> )	水资源量 (亿 m <sup>3</sup> )
		降水深度 (mm)	降水量 (亿 m <sup>3</sup> )			
黄河	794 712	464	3691	661	406	744
淮河及山东诸河	329 211	860	2830	741	393	961
长江	1 808 500	1071	19 360	9513	2464	9613
东南沿海诸河	239 803	1758	4216	2557	613	2592
珠江及华南诸河	580 641	1544	8967	4685	1116	4708
西南诸河	851 406	1089	9346	5853	1544	5853
内陆河	667 443	158	5321	1164	862	1304
全国	6838 322	648	61 889	27 115	8288	28 125

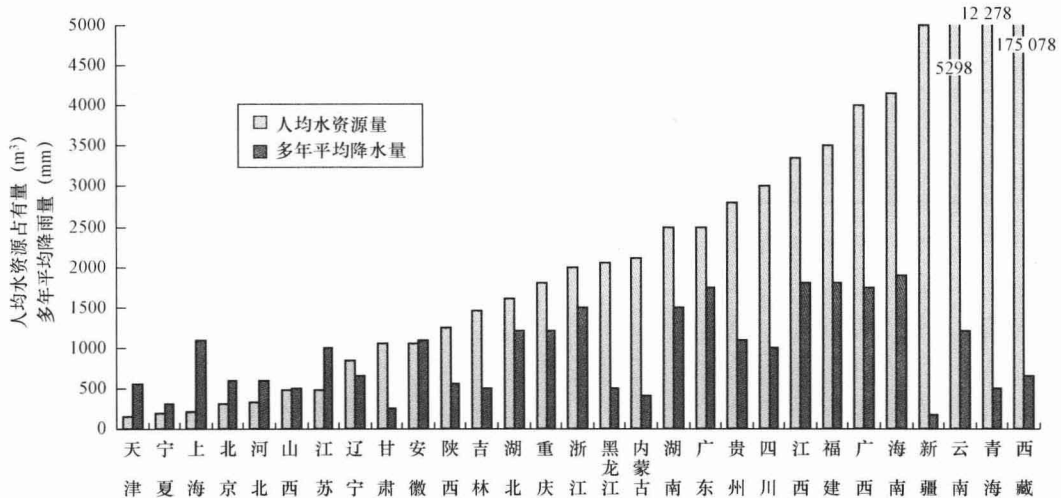


图 1-2 我国各省、直辖市人均水资源占有量及多年平均降雨量

## (二) 北方资源型缺水，南方水质型缺水

水资源在空间上分布不均是导致我国北方资源型缺水的根本原因；南方地区水资源虽然比较丰富，但由于水体污染，水质型缺水也相当严重。所谓水质型缺水，是指有可资利用的水资源，但这些水资源由于受到各种污染，致使水质恶化不能使用而缺水。

长期以来的重经济、轻环保，致使我国众多河流、湖泊水库和地下水被污染，许多地区水质型缺水严重。上海就是典型的水质性缺水城市，守着终年波涛滚滚的黄浦江，却得不到青浦县的淀山湖、宝山区陈行水库或上溯几十公里的上游取水；重庆地处长江、嘉陵江会合处，自然水量丰富，但在重庆主城区却没有可资利用的水源，在重庆两江支流中，重污染和严重污染的断面已达 39.7%。据统计，我国 1200 多条河流中的 850 条受到不同程度的污染，占 70% 以上。7 大河流流经的 15 个主要城市河段中，有 13 个河段的水质受到严重污染，不宜作饮用水源；淮河、海河、辽河几乎整个流域都没有 III 类以上的水体。

近年来，由于污染，我国水质性缺水的城市数量呈上升趋势，严重的缺水城市从原来的

华北地区已漫延到南方地区。水质型缺水与本已存在的资源型缺水彼此叠加,使我国缺水状况雪上加霜。

### (三) 地下水超采,海水入侵严重

地表径流不足加上水体污染严重,使得开采地下水成了一种选择。为了满足地方经济和居民生活用水需求,许多地区不得不开采地下水。统计表明,20世纪80年代初我国地下水超采区有56个,2007年已经发展到了164个;超采区的面积也在逐步扩大,从80年代的8.7万 $\text{km}^2$ 扩大到了19万 $\text{km}^2$ 。华北地区,年开采量达233.6亿 $\text{m}^3$ ,其中浅层地下水开采程度达86.7%,而深层地下水已超采,开采程度达177.2%。

地下水是水资源的一种自然储备形式,一旦开采不适当或超量开采,又不能得到回补,势必造成水资源补给不足、水位大幅下降、地面崩塌和沉降、湿地萎缩、土地荒漠化、海水或咸水入侵、土壤次生盐渍化等环境负效应。据统计,西北地区多年开采形成多处大面积的地下水降落漏斗,总面积达3553.17 $\text{km}^2$ ;准格尔盆地天山北麓地区漏斗中心最大沉降达到54m。华北平原浅层地下水降落漏斗总影响面积达9657.9 $\text{km}^2$ ,深层地下水降落漏斗总影响面积达11904.2 $\text{km}^2$ ,河北平原地面沉降量大于500mm的面积达到508 $\text{km}^2$ 。东北地区地下水降落漏斗面积已经发展到1290 $\text{km}^2$ 。

此外地下水位的下降还会导致工业废水与生活污水的大量渗入,严重地污染地下水源,危及地下水资源安全。对于沿海城市和地区,过度开发地下水还会导致严重的海水入侵。

### (四) 跨流域调水不能解决水资源短缺的根本性问题

跨流域调水是指修建跨越两个或两个以上流域的引水(调水)工程,将水资源较丰富流域的水调到水资源紧缺的流域,以实现地区间调剂水量盈亏,是解决缺水地区水资源需求的一种重要措施。

为了缓解水资源危机,特别是北方地区的缺水问题,我国先后投资兴建了很多的跨流域输水工程项目。例如,引滦入津、引滦入唐、引黄济青、引黄入晋、北水南调、引江济太、东深引水、引大入秦,以及正在修建的南水北调工程。

(1) 引滦入津是为了解决天津市的用水问题,国务院于1981年9月决定兴建引滦入津输水工程,跨流域从300多 $\text{km}$ 以外的滦河引水。工程起点为河北迁西县大黑汀水库,穿越燕山余脉,使滦河水西流,循黎河入于桥水库,全长234 $\text{km}$ ,沿线筑有隧洞、泵站、水库、暗渠、管道、倒虹、桥闸等共215项工程。

(2) 引滦入唐工程由引滦入还、邱庄水库、引还入陡和陡河水库四大工程组成。引滦入唐工程每年可给唐山市和还乡河、陡河中下游输水5亿~8亿 $\text{m}^3$ ,供城市生活和工农业生产用水。

(3) 引黄济青是从黄河下游利津附近开挖渠道,将黄河水向南引入胶莱河至青岛,以解决青岛市缺水问题。此工程于1992年竣工,缓解了青岛工农业生产和人民生活用水问题。

(4) 引黄入晋由万家寨水利枢纽、总干线、南干线、连接段和北干线组成。引水线路总长452.4 $\text{km}$ ,其中总干线44.4 $\text{km}$ ,南干线101.7 $\text{km}$ ,连接段139.35 $\text{km}$ ,北干线166.9 $\text{km}$ 。工程分两期实施,水利枢纽位于山西省偏关县西北的黄河干流之上。

(5) 北水南调是将松花江流域的部分水量调往辽河,以补充辽河中、下游及吉林省和内蒙古自治区沿调水线地区部分用水的工程。

(6) 引江济太是为了改善太湖水体水质和流域河网地区水环境,保障流域供水安全,提高水资源和水环境的承载能力,特别是为缓解太湖地区水污染问题,利用已建成的望虞河工

工程和沿长江其他闸站，将长江水引入河网和太湖，再通过东导流、太浦河、环太湖口门等工程将太湖水送到黄浦江上、下游，浙江杭嘉湖地区，以及沿太湖周边地区。

(7) 东深引水工程是为解决香港水荒而建设的。第四期扩建工程经东江左岸的东莞桥头镇太园一级抽水站，穿越石马河进入东深渠道，注入深圳水库，再通过涵管进入香港的供水系统。

(8) 引大入秦是甘肃省将大通河水跨流域调至秦王川地区的一项大型自流灌溉引水工程，支渠以上工程全长 880km，主要由隧洞群、大渡槽、倒虹吸及明渠等建筑物组成。

(9) 南水北调是我国目前正在实施的最大规模的调水工程，规划东线、中线和西线三条调水线路。通过三条调水线路与长江、黄河、淮河和海河四大江河的联系，构成以“四横三纵”为主体的总体布局，实现我国水资源南北调配、东西互济的配置格局。①东线工程：从长江下游扬州抽引长江水，利用京杭大运河及与其平行的河道逐级提水北送，并连接起调蓄作用的洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖。出东平湖后分两路输水：一路向北，在位山附近经隧洞穿过黄河；另一路向东，通过胶东地区输水干线，经济南输水到烟台、威海。②中线工程：从加坝扩容后的丹江口水库陶岔渠首闸引水，沿唐白河流域西侧过长江流域与淮河流域的分水岭方城垭口后，经黄淮海平原西部边缘，在郑州以西孤柏嘴处穿过黄河，继续沿京广铁路西侧北上，可基本自流到北京、天津。③西线工程：在长江上游通天河、支流雅砻江和大渡河上游筑坝建库，开凿穿过长江与黄河的分水岭巴颜喀拉山的输水隧洞，调长江水入黄河上游。

按照规划，南水北调工程东线、中线和西线到 2050 年的调水总规模将达到 448 亿  $m^3$ ，其中东线 148 亿  $m^3$ 、中线 130 亿  $m^3$ 、西线 170 亿  $m^3$ 。

远距离调水在一定程度上可以缓解缺水地区的水资源短缺问题，但不能从根本上解决我国水资源总量不足的问题，而且远距离调水工程投资成本大，对生态环境的潜在影响尚不明确。据 2010 年 11 月国务院批复的水利部《全国水资源综合规划》，到 2030 年，南水北调东线一、二、三期工程，中线一、二期工程全部建成，并考虑部分海水利用后，我国沿海地区年缺水量仍将达到 214 亿  $m^3$ 。

实践证明，仅仅通过兴建水利工程、实施跨流域调水、推广节约技术等途径并不能从根本上解决水资源短缺问题。寻求新的水源，通过增加淡水供应量来解决局部地区，特别是沿海地区的用水供需矛盾，已逐渐成为大家的共识。通过充分发挥东部沿海濒临大海的区位优势，大力发展海水淡化与综合利用产业，增加沿海淡水资源总量，可从根本上解决制约我国东部沿海地区经济社会快速、可持续发展的瓶颈问题。可以预见，随着人口的增加、经济的发展和城市化的推进以及人民生活质量的提高，我国水资源短缺的形势将更为严峻。借鉴国际先进经验，开发海水淡化技术，从大海中提取淡水已成为解决沿海地区水资源紧缺的重要途径。海水淡化是解决水资源危机，为中华民族开拓新的安全水源的必然选择。

## ▶▶ 第二节 海水淡化技术概况

### 一、海水淡化技术分类

海水淡化又称为海水脱盐，是从海水中提取淡水的技术和过程。通常采用的海水淡化技术分类方法有以下几种：①按被分离出的物质分类；②按分离方法分类；③按能量驱动方式分类。

(1) 按被分离出物质的不同，海水淡化技术可以分为两大类，即将水从海水中分离出来



和将盐从海水中分离出来，见图 1-3。海水中盐的质量分数通常低于 4%，但这并不意味着将盐从海水中分离出来得到淡水的方法更可行。由于技术的限制，目前将水从海水中取出的方法相比将盐从海水中取出的方法更有效。将水从海水中分离出来的方法又可按是否发生相变而分成两类，蒸发和冷冻均属于发生相变过程，而反渗透属于无相变过程。

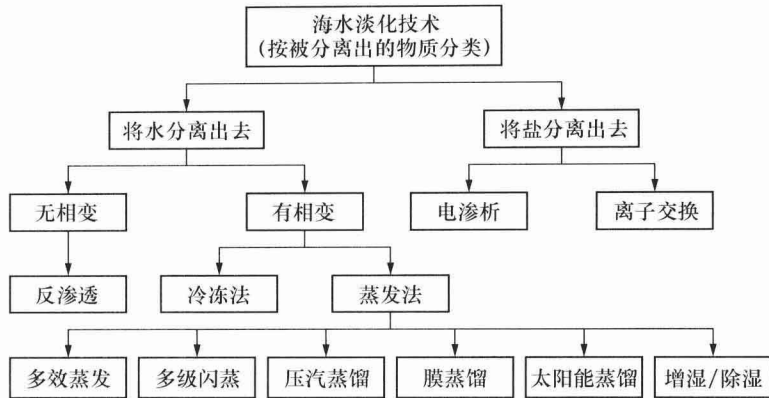


图 1-3 按被分离出的物质对海水淡化技术进行分类

(2) 按分离方法的不同，可以将海水淡化技术分成热法和膜法两大类，见图 1-4。膜法主要包括反渗透和电渗析；热法包括多效蒸馏、多级闪蒸、太阳能蒸馏、冷冻法等。特别需要指出的是，膜蒸馏淡化技术既不属于热法，也不属于膜法，而是介于两者之间。

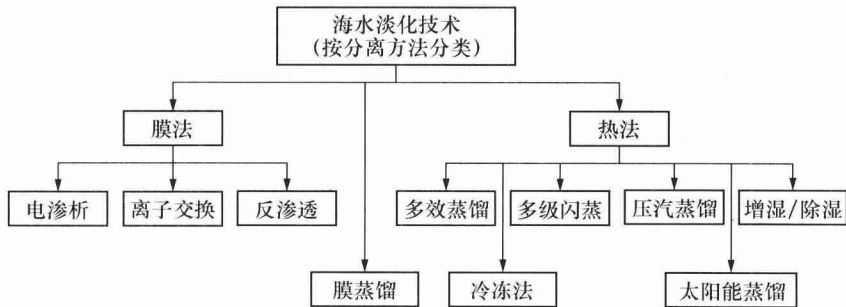


图 1-4 按分离方法对海水淡化技术进行分类

(3) 按驱动能量的不同，可把淡化过程分成机械能、热能和电能驱动三类，见图 1-5。机械能驱动的有压汽蒸馏和反渗透淡化两种；热能驱动的过程又可分为放热和吸热两种类型，冷冻法属于前者，而多级闪蒸、多效蒸馏、太阳能蒸馏、膜蒸馏淡化过程则属于后者。

## 二、淡化技术简介

人类利用海水得到淡水的历史由来已久，有证据表明公元前 1400 年，居住在海边的居民就已经掌握了通过蒸馏从海水中获得淡水的方法，最早的关于海水淡化的记载可以追溯到公元 3 世纪，简单的海水淡化装置在公元 200 年出现在远航船上。到目前为止，研究开发出来的海水淡化方法不下数十种，但是真正工业化应用的还仅局限于电渗析、低温多效蒸馏、多级闪蒸、反渗透、压汽蒸馏等为数不多的几种技术。

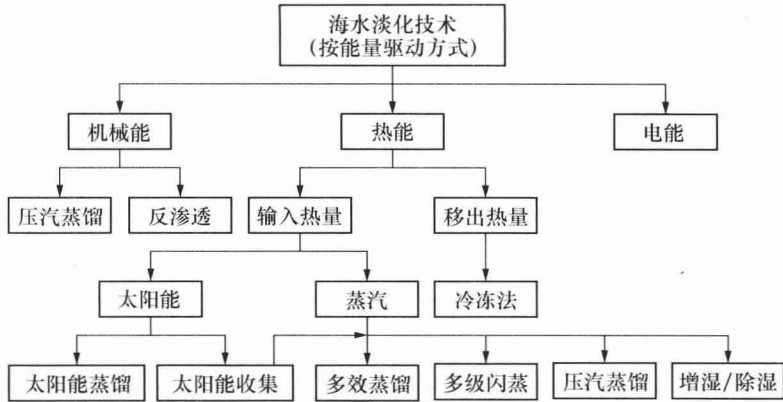


图 1-5 按能量驱动方式对海水淡化技术进行分类

### (一) 电渗析 (electrodialysis, ED)

#### 1. 基本原理

电渗析技术是开发较早并取得重大工业成就的膜分离技术之一。其机理是在直流电场的作用下，离子透过选择性离子交换膜而迁移，从而使电解质离子自溶液中部分分离出来。电渗析所用到的离子交换膜通常是由高分子材料制成的对离子有选择透过性的薄膜，分为阳离子交换膜和阴离子交换膜两种。阳离子交换膜表面带有阴离子基团，而阴离子交换膜表面带有阳离子基团。电渗析最简单的操作单元称为膜堆，它可以构成一个脱盐室和一个浓缩室。一个膜堆的工作效率较低，因此在实际应用中是将几百个膜堆串联起来同时工作以提高效率。

图 1-6 是电渗析的工作原理示意图，图中多个阳离子交换膜和阴离子交换膜交替排列在两个电极之间，海水进入由阳离子和阴离子膜组成的隔室，在电场作用下，海水中的阴、阳离子分别透过阴离子交换膜和阳离子交换膜迁移到相邻的隔室中，从而实现海水中盐分离子和淡水的分离。

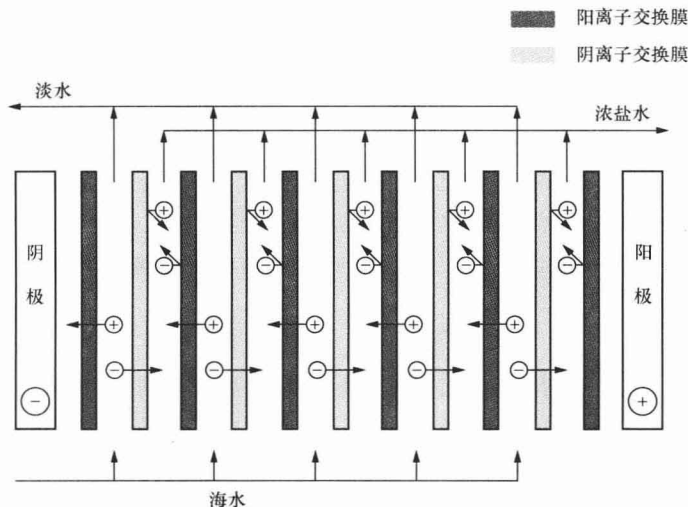


图 1-6 电渗析海水淡化原理