

■ 乔世珊 田玉龙 史晓明 金春华 邵奎兴 编著

海水淡化 技术及应用

*The Technology of Sea Water
Desalinization and Its
Application*



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

序

随着人口与经济的增长，世界水资源的需求量不断增加，水资源短缺已经成为 21 世纪世界各国共同关注的全球性问题。解决人类用水短缺问题的一个重要途径，就是增加可利用的淡水资源总量。

近年来，海水淡化技术的不断进步为增加淡水资源总量提供了一条可供选择之路。目前，海水淡化技术已在全球一百多个国家得到广泛应用。2004 年，全球海水淡化日产量约 3500 万 t，解决了占世界人口 1/40 的地区的供水问题，海水淡化工程额年平均约 50 亿美元，近 15 年市场预计将达到 800 亿美元，并以年均 10%~30% 的速度持续增长。从水资源利用的角度看，海水淡化将会成为优化沿海地区供水结构，保证沿海城市供水安全，化解沿海地区水资源危机的一项重要措施。

水利部组织有关技术人员编写的《海水淡化技术及应用》一书，立足于编写者掌握的最新信息和数据，从海水淡化利用的历史发展沿革入手，比较不同类型的海水淡化技术方法、原理、工艺制造、设备材料等多个具象性内容，对海水淡化技术做出了较为全面和系统的阐述。同时，该书又不拘泥

于技术本身，兼顾成本与能耗，突出海水淡化与水资源开发利用的关系，强调海水淡化这一开源措施相对于地下取水、远距离调水等措施，在技术经济、供水水质以及运行的稳定性和可靠性等方面，有其特点和优势。此外，该书还以发展的眼光，叙述了国内外海水淡化利用产业化发展情况，以及我国在未来一段时期内海水淡化利用产业发展的有关政策、目标、区域布局和发展重点，分析了海水淡化技术应用于非常规水源开发利用的发展前景。总体而言，该书立足海水淡化技术，围绕海水是淡水资源重要的补充来源这一命题，从技术、经济、政策、工程等多视角全面论述，体现了综合性和实用性。

相信该书的出版对我国海水淡化工程技术人员学习了解海水淡化先进技术和发展趋势将大有裨益，同时，对于促进水利行业相关部门，更好地应用海水淡化技术开发利用苦咸水等水源，保障内陆地区饮水安全，优化沿海缺水城市水资源配置，促进节水型社会建设将起到启发和推动的作用。

谨对该书的出版表示衷心的祝贺。

胡

2007.6

前言

近年来，随着海水淡化技术的日趋成熟和成本的大幅度降低，世界各国越来越重视海水淡化技术，并通过这一技术获得了可靠品质的淡水，为解决区域水资源短缺问题找到了一条有效途径。近期，我国政府加大了对海水淡化产业化发展的扶持力度，相继制定出台了《全国海水利用专项规划》和《海水利用标准发展计划》，在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》中再次提出要“积极开展海水淡化和海水直接利用”。

为了更深入地学习和了解海水淡化各项技术和方法，对有关海水淡化领域的内容进行较为系统全面的阐述，我们编写了本书，期望对促进我国海水淡化事业的健康发展能起到有益作用。

本书共分八章，主要内容包括：绪论、海水淡化技术发展、海水淡化方法、海水淡化设备与防腐材料、海水淡化技术经济分析、海水淡化产业化、海水直接利用和非常规水源应用、海水淡化工程典型实例介绍。附录内容包括国内外主要海水淡化技术研发机构、学术组织团体和技术设备供应商。

编写完成后，水利部胡四一副部长欣然为本书作序。

在本书编写过程中，承蒙水利部郭潇、朱庆平和李彦波等专家的大力关怀和帮助。任光照、富曾慈和张德尧等资深专家对本书内容提出了诸多建议，特别是原水利部总工何文垣专家不辞辛劳，几番通读书稿，悉心修改指点，其严谨的治学精神令作者深表敬意。

此外，曲炜、张继群、刘心爱和田向荣等同志也为本书的编写提供了有益帮助。书中有关数据资料由国家海洋局杭州水处理技术研究开发中心和天津海水淡化研究所的有关同志提供，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在错误，恳请广大读者批评指正。

编者

2007年6月

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 淡水资源状况	1
第二节 水危机形势	2
第三节 补充淡水资源的有效手段	4
第二章 海水淡化技术发展	6
第一节 国外发展历程	6
第二节 国内发展现状	12
第三章 海水淡化方法	21
第一节 综述	21
第二节 海水淡化的前处理	23
第三节 蒸馏法海水淡化	31
第四节 电渗析法海水淡化	46
第五节 反渗透法海水淡化	56
第六节 太阳能蒸馏法海水淡化	68
第七节 核能海水淡化	70
第八节 冷冻法海水淡化	77
第四章 海水淡化设备与防腐材料	82
第一节 海水淡化关键设备元件	82
第二节 海水淡化防腐与材料	107
第五章 海水淡化技术经济分析	115

第一节	不同淡水取用方式	115
第二节	海水淡化成本与能耗	118
第三节	海水淡化技术经济分析	126
第六章	海水淡化产业化	131
第一节	海水淡化大市场	131
第二节	我国的海水淡化产业化	135
第三节	思考与对策	149
第七章	海水直接利用和非常规水源应用	160
第一节	海水直接利用	161
第二节	污水资源化	164
第三节	苦咸水淡化	169
第四节	非常规水源应用实例	175
第八章	海水淡化工程典型实例介绍	181
第一节	国内海水淡化工程	181
第二节	国外海水淡化工程	194
附录一	国内外主要海水淡化技术研发机构	207
附录二	国内外主要海水淡化学术团体、组织	213
附录三	国内外主要海水淡化技术与设备供应商	216
参考文献	233
结语	237

第一章 绪 论

人类所赖以生存的淡水资源正在迅速减少，水资源短缺导致了全球的水质恶化、干旱和荒漠化、土壤盐碱化等现象不断扩大，影响到全球经济发展与生态环境，缺水地区在扩大，甚至引起了国家和地区间的冲突。数据表明：世界上有一半发展中国家人口严重缺水，在这些地区，80%~90%的疾病与水有关，30%的死亡与水质不良有关。据预测：今后的25年内，受到缺水影响的人口将会增加4倍以上，与此同时，世界供水量每20年翻一番，需求量的增长是人口增长速度的两倍。

由于淡水的缺乏，提供足量的合格淡水已经成为极具挑战性的工作。半个世纪以来，海水淡化技术和产品开始受到极大的关注，海水淡化已经和正在改变人们的思维 and 传统意识，海水淡化工程在全球的成功实施为人们带来了可靠淡水，发挥了替代补充淡水资源的积极作用，成为当今解决水资源短缺、增加缺水地区淡水资源总量和优化水资源配置的重要手段和有效途径。

第一节 淡水资源状况

地球上淡水量所占比重很小，绝大部分水存在于海洋中。地球表面、岩石圈内、大气层中和生物体内各种形态的水，总计约为1385984.61万亿 m^3 。其中，海水为1350919万亿 m^3 ，占全球水总量的97.47%，其余2.53%是淡水，大约为35065.41万亿 m^3 （见图1-1）。在2.5%的淡水中，69.5%被固存在两极冰盖和高山冰川中，剩余30.5%存在地下含水层

和永久冻土层中,属于不可再生的,而能被人类利用的湖泊、河流、土壤中所容纳的淡水只占 0.3% (见图 1-2)。

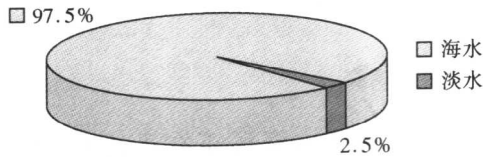


图 1-1 全球海水资源量和淡水资源量对比

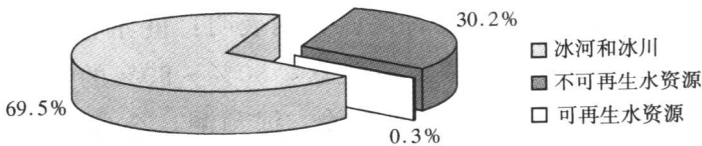


图 1-2 地球上淡水资源构成

全球水资源就分布而言,主要集中在亚洲、南美洲、非洲和北美洲,这些地方的水资源总量占世界水资源总量的 83.1%。全球多年平均年径流量为 46.89 万亿 m^3 ,由于各大洲自然条件差别较大,因而水资源量也不相同。例如,大洋洲年降水量几乎达到 3000mm,年径流深超过 1500mm,是世界上淡水资源最为丰富的地区;而澳洲年降水量不到 300mm,平均年径流深只有 40mm,是世界上水资源最少的大陆。

第二节 水危机形势

全球淡水资源匮乏且时空分布不均,近一个世纪以来,随着人口的增加,用水量逐年增加,人类对水资源的依赖程度越来越明显。全球气候变暖、环境污染、资金投入不足等一系列问题,更加剧了全球水资源危机的形势,水危机已成为世界所关注的一个焦点。

根据联合国教科文组织 2006 年 3 月 13 日公布的《世界水

资源开发报告》的有关数据，从1900~1995年，全球用水量由5790亿 m^3 增加到37880亿 m^3 ，增加了6倍。其中，农业用水增加了4倍，工业用水增加了16倍，城市生活用水增加了16倍。同一时期，全球人口增加了3倍，用水量的增长速度几乎是人口增长速度的2倍。而人均水资源量则由1900年的23445 m^3 降低到1995年的7815 m^3 。全球1900~1995年人均水资源量与工业、农业和城市生活用水量变化趋势如图1-3所示。

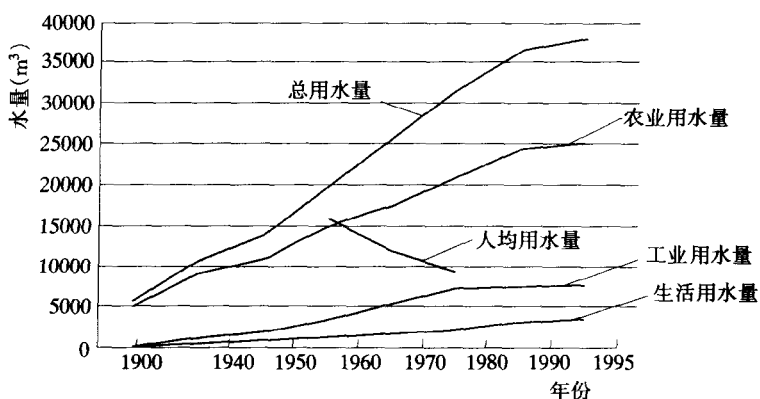


图 1-3 全球 1900~1995 年各业用水量与人均水资源量变化趋势图

我国多年平均天然河川年径流量为 27115 亿 m^3 ，位居全球各国第六，但人均水资源量较低，是联合国公认的 13 个贫水国之一。全国半数以上的城市缺水，北方地区几乎所有城市都严重缺水，北京、天津、河北、山西、辽宁、上海、江苏、山东、河南和宁夏 10 个省（自治区、直辖市）人均水资源量低于 500 m^3 ，大连、天津、烟台、青岛等城市人均水资源都在 200 m^3 左右。全国占地面积大于 500 km^2 的岛屿有 6500 多个，其中绝大部分严重缺水。根据有关研究成果，我国用水量自 1997 年以来基本保持稳定，但随着社会经济的发展，到 2030 年将缺水 129 亿 m^3 。面对日益缺水的形势，各地采取了兴建蓄水工程，实施跨流域调水，加大节约用水和废水回用力度等

措施，有效缓解了淡水紧缺形势。例如，1983年竣工的引滦入津工程，极大地缓解了天津市的工业生产和生活用水紧缺；大连市完成的引碧入连工程，缓解了大连市的用水矛盾；山东青岛的引黄济青工程，每年为青岛提供黄河水1亿多 m^3 ，为青岛市的经济发展和生活水平提高提供了保障。

第三节 补充淡水资源的有效手段

随着我国沿海经济的快速发展和人民生活水平的提高，部分沿海城市的供水仍然不能满足发展需要，环渤海大部分城市缺水严重，特别是海岛及个别地区缺水形势非常严峻。天津引滦入津完成后，经过十几年的发展又出现水资源的不足。特别是2000年，我国北方地区出现了多年不遇的干旱，天津市供水告急，中央不得不临时从黄河调水4亿 m^3 解决天津市的水荒问题；大连市已经完成的引碧入连工程，原规划测算可保证大连市2005年供水需求，但目前出现了水源不足的问题，不得不从300km以外的大洋河调水，工程浩大，每吨水成本超过10元。2000年的干旱给沿海城市造成的冲击是空前的，山东的烟台、青岛、威海等地用水均出现明显不足，威海、大连不得不关闭洗车和大部分洗浴行业，对用水大户严格限水。

解决沿海地区淡水资源短缺问题，基本途径是开源节流，一方面号召全民节水，努力构建节水型社会，提高水的利用效率；另一方面是积极寻找替代水源，对于沿海缺水城市来说，在实施跨流域调水的基础上，有效利用海水淡化，做到跨流域调水与海水利用并重。

海水淡化作为一种开源方式，可充分利用储量丰富的海水资源，补充缺水地区的淡水资源总量。随着城市供水成本的不断提高，海水淡化成本的不断降低，海水淡化技术已经越来越受到重视。根据联合国统计，目前全球有14亿人缺乏安全清

洁的饮用水，即平均每 5 人中便有 1 人缺水，估计到 2025 年，全世界有近 1/3 人口缺水，波及的国家和地区将达到 40 多个。作为水资源的开源增量技术，海水淡化已经成为解决全球水资源危机的重要途径。目前，已有 120 多个国家在应用海水淡化技术，海水淡化日产水量约 3300 万 m^3 ，其中 80% 用于饮用水，解决了 1 亿多人的供水问题。在各国政府的推动下，海水淡化作为新兴朝阳产业不断向前发展。

从长远来看，随着水资源的日趋紧张、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不断发展和完善，海水淡化水将不仅成为沿海缺水城市和海岛居民生活用水的主要来源，起到重要的补充水源和应急水源作用，而且将发挥显著的替代淡水作用，成为解决水资源危机，构建节水型社会的有效措施。利用海水淡化技术增加淡水资源将是今后解决区域水资源不足，特别是沿海地区缺水状况的一项重要途径和有效手段。

第二章 海水淡化技术发展

随着世界各国经济的高速发展以及人口的迅速增长和集中，世界各国对水的需求日益增加，而地球上的淡水资源非常有限，淡水资源缺乏已成为全球性的问题。在寻求淡水资源方面各国纷纷把目光投向大海，据统计，目前全世界已有 100 多个国家缺水，其中严重缺水的达 20 个，严重影响着人类生存和社会发展。海洋中水的储量为 1350919 万亿 m^3 ，占全球的 97.47%，如何把它变为能被人类利用的淡水，成为亟须解决的问题。

第一节 国外发展历程

一、发展概况

早在 15 世纪，就曾有人提出海水淡化的问题，航海部门曾以简易的蒸馏装置来解决海船在长期航行中的淡水供应问题。第二次世界大战期间，出于战争的需要，为了供应战舰和岛屿的淡水，用蒸馏法淡化海水的技术有了较大的发展。从 20 世纪 50 年代以来，随着社会经济的发展和城市人口的增长，淡水供应逐渐紧张。作为开发新水源的重要途径之一，一些经济发达国家设立了专门机构从事海水（或苦咸水）淡化技术的研究开发和应用工作。例如，为解决水危机，美国从 1952 年起专设盐水局，1974 年后转为资源技术局，不断推进了水处理和脱盐技术进步；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

动海水淡化的发展。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。在其后的10多年中蒸馏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。

海水淡化技术随着水资源危机的加剧得到了快速发展,已成为新兴的高新技术产业。目前,无论是中东的产油国还是西方的发达国家都建有相当规模的海水淡化厂。沙特阿拉伯、阿联酋、以色列等中东国家70%的淡水资源来自海水淡化。美国、日本、西班牙等发达国家为了保护本国的淡水资源也竞相发展海水淡化产业。沙特阿拉伯在20世纪60年代就大规模发展海水淡化产业,成立了海水淡化总公司,全面负责海水淡化工程。目前该国已建立了30座大型海水淡化厂,修建了世界上最长的海水淡化输水管线。阿联酋饮用水主要依赖海水淡化水,2003年日产淡化水量达546.6万 m^3 。意大利西西里岛有500万居民,2005年日产淡化水量为13.5万 m^3 ,约占全部居民可饮用水源的15%~20%。

此外,世界上许多拥有海水资源的国家,大量采用海水替代淡水以满足工业用水和生活用水的需求。一些国家的海水直接利用量已占工业总用水量的40%~50%。目前,美国、日本和欧洲每年的海水直接利用量分别为1000亿 m^3 、3000亿 m^3 和2000亿 m^3 左右。海水利用已经成为沿海城市和地区水资源利用的重要组成部分,作为可持续开发淡水资源的手段已经越来越为世界各国所重视。

二、基本现状

目前世界上有130多个国家应用海水淡化技术,共有100t级以上海水淡化厂1.36万座,并以年增长率为15%~25%的

速度攀升。据国际脱盐协会统计,截至 2004 年底,全世界海水淡化水日产量已近 3300 万 m^3 ,蒸馏法占 50.5% (其中多级闪蒸占 43.5%),反渗透法占 43.5%,电渗析法占 5%,其他方法约占 1%。2004 年世界淡化水产量见表 2-1。世界海水淡化工程投资额平均约 50 亿美元/年,近 15 年市场预计将达到 800 亿美元,并以 10%~30% 的速度持续增长。经淡化的海水最远输送距离达 470km,解决了 1.57 亿人(世界人口的 1/40) 的供水问题。

表 2-1 2004 年世界海水淡化水产量 (含苦咸水淡化)

海水淡化方法	淡化水产量 (万 m^3/d)	海水淡化方法	淡化水产量 (万 m^3/d)
反渗透法 (RO)	1400	电渗析 (ED)	190
多级闪蒸 (MSF)	1290	纳滤 (NF)	140
多效蒸发 (MED)	120	合计	3290
压汽蒸馏 (VC)	150		

随着技术进步,海水淡化的成本进一步降低,海水淡化成本已从 20 世纪六七十年代的 2 美元/ m^3 以下降低到目前 0.5 美元/ m^3 的水平,接近或低于国际上一些城市的自来水价格。沙特阿拉伯的淡化水产量是世界最高,占世界总产量的 1/4;美国产量位居第二位,占世界总产量的 15.2%。在海水淡化装置的制造国中,美国和日本各占据市场份额的 30%。韩国从 20 世纪 80 年代起步,到 80 年代末已经成为海水淡化设备的出口国。1990 年以来,国外海水淡化装置的日生产量平均增长约 200 万 m^3 。目前世界海水淡化的主要市场在中东地区,占淡化市场的 60%,美洲占淡化市场的 20%,其他地区占 20%。

目前,世界上最大的蒸馏法(多级闪蒸)海水淡化厂是沙特阿拉伯的 Shuaiba 海水淡化厂,产水量 46 万 m^3/d ,是多级闪蒸造水与热电厂发电双重目的的结合。另一套同类型、同效用的装置建在阿联酋,产水量 32.4 万 m^3/d ,单机产水量

4500~5700m³/d, 淡化设备的投资为 5.44 亿美元。世界最大的低温多效海水淡化厂是阿联酋 Taweelah A1 海水淡化厂, 产水量 24 万 m³/d。世界最大的反渗透海水淡化厂是以色列南部地中海工业区的阿什克隆海水淡化厂, 产水量 33 万 m³/d。位于美国尤马的日产淡化水 38 万 m³ 的苦咸水淡化厂是世界最大的苦咸水脱盐工厂。

三、发展趋势

(一) 技术日趋成熟

国内外海水淡化技术的未来发展将始终沿着节约能源、降低成本、提高淡化系统可靠性的方向, 向高效化、低能化和规模化的目标稳步前进。为充分合理地利用各种特定优势条件和优势资源, 今后的发展将是全方位的, 即在大力发展适用性较强的技术(如多级闪蒸、低温多效蒸发、反渗透和直接冷冻)的同时, 努力挖掘特定技术(如太阳能蒸馏)的潜力, 为综合利用各种地球资源开辟广阔的道路。

近年来, 低温多效蒸发、反渗透和多级闪蒸已成为适用于大型海水淡化技术的主流。

多效蒸发方法是 20 世纪 30 年代使用的方法, 其优点是传热系数很高, 所用传热面积小, 动力消耗少, 操作弹性大等; 缺点是传热管壁上易结垢, 需要经常清洗和严格防垢。目前的主要研究方向是在低温多效操作技术的开发, 增加单机容量、扩大产水规模并进一步降低能耗, 以减少结垢、腐蚀, 降低成本。

多级闪蒸是针对多效蒸发结垢严重的缺点发展起来的, 优点是加热面和蒸发面分开, 加热面上结垢轻; 技术缺陷是动力消耗大, 设备腐蚀和结垢速度较快。其主要发展方向是进一步扩大单机容量, 实现系统设计最佳化、管理软件化和操作自动化。采用聚羧酸酯等新型防垢、抑垢和分散剂, 可提升运行温

度；开发新兴高级奥氏不锈钢代替镍基合金，可提高运行可靠性、稳定性。进一步改进工艺，使目前能耗总体水平处于 $8\sim 10\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 状态。

反渗透技术在膜、膜组件和工艺上已日趋成熟。近年来的重大进展在于功能交换器和压力交换器的成功开发，可使能量回收高达 90% 以上，从而使其能耗降至 $3.8\sim 4.3\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。反渗透海水淡化对前处理的要求很严格，需要重视微溶盐结垢和膜污染。

电渗析技术的开发方向是研制大容量膜堆和新型 ED 膜，扩大生产规模，在高温电渗析等节能技术的基础上继续开展新技术、新部件、新装置的研制。

直接冷冻（主要是真空冷冻）技术经济可靠，应加大步伐使之尽快在生产中得到普遍应用。太阳能蒸馏及天然冷冻技术可因地制宜发展并推广利用，作为其他海水淡化技术的有效补充。

（二）技术集成趋势

海水淡化技术发展的总趋势是在自身完善和成熟的基础上，最终实现各种海水淡化技术的技术集成和优化组合。例如，热膜联产（反渗透—低温多效或多级闪蒸—反渗透）、反渗透—直接冷冻、蒸馏—冷冻等技术集成，这些技术的组合可使其优点得到很好的发挥，有效地降低制水成本，并创造巨大的经济效益和社会效益。

热膜联产主要是采用热法和膜法海水淡化相联合的方式（即低温多效—反渗透或多级闪蒸—反渗透方式），满足不同用水需求，降低海水淡化成本。目前，世界上最大的热膜联产海水淡化厂是阿联酋富查伊拉海水淡化厂，日产水量为 $45.4\text{万}\text{m}^3$ ，其中，多级闪蒸日产水 $28.4\text{万}\text{m}^3$ ，反渗透日产水 $17\text{万}\text{m}^3$ 。热膜联产优点是投资成本低，可共用海水取水口。