



“十三五”
国家重点图书

海洋工程材料丛书

Series
on Materials
for Marine Engineering

Seawater utilization
Equipment and
Materials

海水资源综合利用 装备与材料

阮国岭 高从堦 主编



化学工业出版社



“十三五”
国家重点图书

海洋工程材料丛书

Series
on Materials
for Marine Engineering

Seawater utilization
Equipment and
Materials

海水资源综合利用 装备与材料

阮国岭 高从堦 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《海水资源综合利用装备与材料》是国家出版基金项目“海洋工程材料丛书”的分册之一。

本书在调研和总结国外海水资源综合利用装备开发设计原则及选材要求的基础上,结合作者及其团队多年从事海水资源综合利用技术装备开发方面的经验编写。全书分为6章,对蒸馏法海水淡化、反渗透海水淡化、海水化学资源提取、海水直接利用、含盐废水处理的工艺和装备特点,以及装备选材原则、结构材料在特殊工况环境中的腐蚀防护措施、功能分离膜材料的种类和性能要求等进行了详细论述,并对海水资源综合利用技术及装备材料发展前景进行了展望,以期准确地反映海水综合利用行业装备用材的现状,更希望作为上游材料行业研发升级海洋工程专用耐蚀材料的基点,通过学科的交叉和融合提升我国海水资源利用技术和产业的国际竞争能力。

本书可供海水资源利用工程设计人员以及电力、市政、材料等行业的技术人员工作使用,也可作为国内水处理公司技术人员和相关专业的本科生和研究生的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

海水资源综合利用装备与材料/阮国岭,高从堦主编.
北京:化学工业出版社,2016.3
(海洋工程材料丛书)
ISBN 978-7-122-26327-8

I. ①海… II. ①阮… ②高… III. ①海水资源-综合利用-工程设备②海水资源-综合利用-水工程材料
IV. ①P746.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 032705 号

责任编辑:咎景岩 窦臻
责任校对:吴静

文字编辑:孙凤英
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装:三河市航远印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张20 $\frac{3}{4}$ 字数468千字 2017年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00 元

版权所有 违者必究

“海洋工程材料丛书”

编委会

顾问：徐匡迪^{院士} 周济^{院士} 干勇^{院士} 王曙光

主任：周廉^{院士}

副主任：丁文江^{院士} 薛群基^{院士} 翁宇庆^{院士} 周伟斌

委员：(按姓名汉语拼音排序)

才鸿年 ^{院士}	蔡斌	常辉	陈建敏	陈祥宝 ^{院士}	陈蕴博 ^{院士}
丁文江 ^{院士}	窦臻	方志刚	高从增 ^{院士}	宫声凯	韩恩厚
何季麟 ^{院士}	侯保荣 ^{院士}	黄国兵	蹇锡高 ^{院士}	李贺军	李鹤林 ^{院士}
李晓刚	李仲平 ^{院士}	李宗津	刘敏	刘振宇	马朝利
马伟明 ^{院士}	马运义	阮国岭	尚成嘉	沈晓冬	苏航
宿彦京	唐明述 ^{院士}	屠海令 ^{院士}	王国栋 ^{院士}	王景全 ^{院士}	王向东
王一德 ^{院士}	翁宇庆 ^{院士}	吴有生 ^{院士}	徐芑南 ^{院士}	薛群基 ^{院士}	杨雄辉
曾恒一 ^{院士}	张金麟 ^{院士}	赵解扬	肇研	周克崧 ^{院士}	周廉 ^{院士}
周守为 ^{院士}	周伟斌	朱英富 ^{院士}	左家和		

编委会办公室

主任：李贺军 马朝利 常辉 贾豫冬

成员：(按姓名汉语拼音排序)

陈俊	邓桢桢	丁洁	丁陵	杜伟	冯余其	李伟峰
陶璇	王帅	王媛	徐克	姚栋嘉	余启勇	咎景岩

《海水资源综合利用装备与材料》 编委会

主 任 阮国岭 高从堦^{院士}

委 员 (按姓名汉语拼音排序)

冯厚军 高从堦^{院士} 高丽丽 黄西平 刘 伟 吕庆春 阮国岭

王维珍 王晓玲 徐 克 尹建华 张 琦 赵河立 周 勇

秘书长 徐 克

序

进入 21 世纪以来,材料特别是新材料已被视为新技术革命的基础和先导。海洋材料长期以来并未被纳入新材料体系范畴,发展速度远远落后于航空、航天材料。21 世纪是海洋的世纪,人类生存和发展越来越依赖于海洋。党的十八大后,建设海洋强国成为重要国策,海洋工程装备及海洋材料作为拓展海洋空间、开发海洋资源的物质前提,是实施海洋科技创新、建设海洋生态文明的物质基础,是提升海洋国防实力、维护海洋权益的物质保障。发展好我国的海洋材料,对实现海洋强国目标将产生重要的积极作用。

海洋的重要性主要体现在三个方面。首先,海洋经济是国民经济的重要组成部分,而海洋经济的发展离不开海洋资源的开发和利用,海洋资源的合理利用能够实现海洋经济的可持续发展。其次,海洋安全是国土安全的重要支撑,因此维护海洋安全至关重要,是国家海洋发展战略的重要组成部分。再次,海洋面积之大,海洋中物质、生物之多及自然现象之复杂,其重要性不亚于陆地及空天,对海洋的科学研究有助于人们认识海洋、了解自然。鉴此,海洋不仅已成为人类赖以生存、社会借以发展、濒海国家持续安泰昌盛的战略发展空间和基地,而且已成为当今世界军事和经济竞争的重要领域,军事竞争的焦点日益转向争夺海上控制权。

海洋资源主要有海洋矿产资源、海水资源、海洋生物资源、海洋旅游资源等。对海洋资源的利用包括海洋交通运输、海洋油气矿业、海洋渔业及生物资源、风力发电、潮汐发电、海水淡化等。海洋材料包括对这些海洋资源开发利用的工程装备(各种离岸、近岸工程建设以及勘探开采油气矿物资源所需的机械工程装备、海洋交通运输装备等)用材料。

海洋材料也包括涉及海洋安全的军用舰船(如航空母舰、护卫舰、潜艇等)和执法船用材料,以及用于各种海洋科学研究的装备和仪器(如海洋考察船、极地科考船、深海装备、海底电缆等)用材料。

2013—2014 年,中国工程院分别启动了“中国海洋工程材料研发现状及发展战略初步研究”“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”两个咨询项目,中国工程院化工、冶金与材料工程学部联系机械、环境、能源等学部 30 余位院士,组织了全国 200 余位海洋工程领域的专家、学者,历时两年多的时间完成了咨询项目,对海洋工程材料领域的共性问题、关键技术和特殊应用领域进行了深入的调查和研究,为建立我国海洋工程材料完善的科学体系提供咨询建议,使“一代海洋材料,一代海洋装备”的理念更加深入人心,被誉为至理名言。以此为基础,本项目组组织国内材料领域的众多知名专家、学者,编撰了这套“海洋工程材料丛书”。丛书凝聚了 200 余位科学家和工程技术专家的群体智慧。

海洋材料应是海洋中各种工程装备应用材料的总称,是指在能适应海洋恶劣的环境、抵抗海水和生物体的侵蚀、能满足各类海洋工程装备应用需求的环保的可持续发展的材料。本套丛书内容除了包括海洋工程装备范畴的海洋资源利用开发等涉及的材料,还包括海洋安全、海洋科学研究涉及的材料。

丛书紧扣国家海洋强国的战略需求,从“材料”“腐蚀防护”“工程装备”三个层面,总结和梳理了改革开放 30 年来我国海洋材料及应用方面的基础理论积累、重大研究和应用成果,重点突出了关键技术,介绍了国内外在该领域的先进技术、装备和理论研究,并展望了海洋材料和材料技术的发展趋势。丛书共有十一个分册,分别是《中国海洋工程材料发展战略咨询报告》《海洋工程钢铁材料》《海洋工程钛金属材料》《海洋工程有色金属材料》《海洋工程聚合物基复合材料》《海洋工程水泥与混凝土材料》《船舶装备与材料》《海洋石油装备与材料》《海水资源综合利用装备与材料》《海洋工程材料腐蚀行为与机理》《海洋工程材料和结构的腐蚀与防护》。其中,海洋工程装备材料的腐蚀与防护是解决海洋工程材料应用的核心技术,除在各材料分册有关章节予以描述之外,《海洋工程材料和结构的腐蚀与防护》及《海洋工程材料腐蚀行为与机理》分册又对海洋腐蚀的特点、腐蚀机理、材料防腐要求等方面进行了专门论述。这套丛书另一个突出亮点是材料与海洋工程装备应用的结合,专设三个分册分别叙述了船舶装备、海洋石油钻井平台及海水综合利用等几个主要海洋工程领域的发展现状、发展趋势以及对各种材料的需求。

丛书内容颇为广泛,具有较强的创新性、理论性和实用性,较好地反映了海洋工程材料及应用的全貌,文字深入浅出,简洁明了,系统介绍了相关材料的特点和应用,能为读者从不同应用范围、不同材料及技术等角度了解海洋工程材料提供很好的帮助,具有较高的学术水平和应用价值。本丛书增强了材料科学与应用的结合,必将对推动我国海洋材料的发展起到积极的作用。

希望本丛书的出版,能够对从事船舶、海洋工程基础及应用研究、生产单位的科技工作者系统地了解 and 掌握本领域的发展现状和未来,在重大工程和装备的选材设计、制备加工、防护技术、服役安全等方面提供理论支撑和技术指导,对进一步开展创新研究工作有所帮助,同时也可以作为广大材料专业的本科生及研究生的参考教材。

中国工程院院士



2016 年 3 月

前言

水是生命之源、生产之要、生态之基。随着全球经济社会的快速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最大挑战之一。向大海要水源，大力发展以海水淡化、海水直接利用为主的海水资源综合利用技术，提升滨海缺水地区的淡水资源可供应量，降低工业生产对本地区紧缺淡水资源的依赖，同时发展海水化学资源提取、废水零排放技术，减少大规模海水资源利用可能产生的海洋环境负面影响，促进源水区的生态环境改善，正在成为全世界沿海国家和地区应对水资源危机的主要措施。近 20 年来，海水资源综合利用技术在全球有了快速发展，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、美国等发达国家。而且，为了应对当前全球气候异常变化的影响，越来越多的亚洲、非洲、大洋洲、中美洲等发展中国家也对海水资源综合利用技术日益关注。

我国既是水资源总量的大国，也是人均水资源量的贫国，水资源安全始终是国家安全的核心，也是国家“两个百年”战略目标实现的重要基础。早在 20 世纪 60 年代，我国就开始进行海水资源综合利用技术研究工作，进入新世纪更是得到了全社会和学术界的极大关注，被认为是解决当前和未来较长一个时期我国水资源安全问题的重要措施。目前，我国已成为完全独立掌握海水资源综合利用技术的少数国家之一，海水淡化产能从 10 年前的不足 3 万立方米每天提升到 90 多万立方米每天，工业冷却用海水量增长到 1000 多亿立方米每年，90% 以上的滨海电力企业采用海水冷却技术。这些海水资源利用工程的投建，缓解了我国滨海地区淡水资源供应的紧张状况，成为促进我国沿海地区经济可持续发展的重要推力。近些年在国家的大力支持下，我国海水资源利用装备市场得到了快速发展，一批大中型国有企业、民营企业纷纷将海水资源综合利用技术及装备作为企业的新经济增长点，部分研究机构、企业已具备与国外相关企业同台竞技的能力，自主技术装备走出国门，开始在国际市场上崭露头角。

然而，我国海水资源综合利用技术与发达国家相比还有一定差距，主要表现在关键材料和设备方面，如海水淡化反渗透膜及组件还相当依赖进口，低成本耐蚀材料装备的设计、加工及工程应用技术还有待系统研究，关键装备如大型蒸馏海水淡化蒸发器及蒸汽喷射泵、反渗透海水淡化高压泵/能量回收装置、自然通风海水冷却塔、海水脱硫吸收塔等的优化设计及系统集成能力还有待加强等，这些都成为提升我国海水资源综合利用技术竞争力亟待解决的核心问题。

此外，我国虽已开展材料在天然海水中的长期腐蚀研究，对不同种类钢铁、有色金属、混凝土等工程材料在海洋大气区、浪花飞溅区、海洋潮差区、海水全浸区和海底泥土区的腐

蚀机理有了一定了解和腐蚀数据的积累。但由于海水资源利用装备材料所处的工况环境不同于天然海水,内部工艺海水的盐度、温度、溶解氧含量、pH 值等与自然海水差别较大,其对装备材料的腐蚀影响存在较大差异。我国海水资源利用技术的规模化发展起步较晚,装备选材大多依据国外经验,在材料环境腐蚀机理及防护措施方面尚未进行系统总结,这不仅制约了海水资源综合利用技术领域的新材料、新装备开发和应用研究,也导致用户对自主技术装备长期可靠性的担忧。

本书以中国工程院启动的“中国海洋工程材料研发现状及发展战略初步研究”和“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”两个咨询项目的实施为契机,在调研和总结国外海水资源综合利用装备开发设计原则及选材要求的基础上,结合作者及其团队多年从事海水资源综合利用技术装备开发方面的经验编写。本书系统论述了海水淡化、海水化学资源提取、海水直接利用、含盐废水处理的工艺和装备特点,以及装备选材原则、结构材料在特殊工况环境中的腐蚀防护措施、功能分离膜材料的种类和性能要求等内容。

全书共 6 章,阮国岭、高从堦担任主编,其中第 1 章由阮国岭、高从堦、徐克编写,第 2 章由徐克、张令品、齐春华、吕庆春、张晓晨、孙靖、刘艳辉、苗超编写,第 3 章由高从堦、王晓玲、周勇、苏立永、赵河立、苏慧超、莫颖慧、胥建美、徐国荣、邵天宝、吴水波、刘筱昱、李露编写,第 4 章由黄西平、张琦、高春娟、刘伟、王俐聪、骆碧君编写,第 5 章由尹建华、王维珍、高丽丽、李运平、樊利华、崔振东、侯相钰编写,第 6 章由阮国岭、徐克、王晓玲、齐春华、张乾、任建波、邢玉雷、徐国荣、张晓晨、刘艳辉编写。

本书可供海水资源利用工程设计人员,电力、市政、材料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的本科生和研究生的参考书。希望本书的出版能对读者有所裨益,为推进我国海水资源综合利用领域与上游材料行业的协同发展尽绵薄之力。

本书得到了中国工程院海洋工程材料调研项目组总负责人周廉院士的大力支持,项目组各位材料领域的院士、专家为本书成稿提供了许多积极意见和建议,特此表示感谢。由于本书涉及多学科交叉,内容较为广泛,加之编者水平所限,不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所 阮国岭

2016 年 6 月 20 日

目录

第 1 章 海水资源综合利用工程概述

1.1 海水资源综合利用的战略地位和发展前景	1
1.1.1 水危机	1
1.1.2 世界水资源分布	2
1.1.3 我国水资源概况	3
1.1.4 国际海水资源综合利用现状	5
1.2 我国海水资源利用技术发展概述	7
1.2.1 总体概况	7
1.2.2 海水淡化技术发展现状	7
1.2.3 海水直接利用技术发展现状	8
1.2.4 海水化学资源提取及综合利用技术	8
1.3 新材料对海水利用产业发展的促进作用	9
参考文献	11

第 2 章 蒸馏海水淡化工程材料

2.1 蒸馏海水淡化技术及装备简介	12
2.1.1 多级闪蒸海水淡化工艺及装备	12
2.1.2 低温多效蒸馏海水淡化工艺及装备	15
2.1.3 机械压缩蒸馏海水淡化工艺及装备	19
2.2 蒸馏海水淡化装备选材与设计	21
2.2.1 概述	21
2.2.2 蒸发器筒体选材	22
2.2.3 传热材料与管板	27
2.2.4 主体装备其他部件选材	39
2.2.5 工艺管路系统	43
2.3 主要材料的环境腐蚀特点及防腐措施	46
2.3.1 碳钢的腐蚀及防护	46
2.3.2 不锈钢的腐蚀及防护	50
2.3.3 铜合金材料的腐蚀及防护	54
2.3.4 钛及钛合金的腐蚀及防护	59
2.3.5 铝合金的腐蚀及防护	61
2.4 工程材料经济性分析	63
2.4.1 蒸馏海水投资构成及估算方法	63

2.4.2 装备选材对工程投资的影响	67
2.4.3 装备选材对造水成本的影响	71
2.5 北疆发电厂 20 万吨/日低温多效蒸馏海水淡化工程	73
2.5.1 项目概况	73
2.5.2 装备运行条件	74
2.5.3 装备选材及运行成本构成	76
参考文献	77

第 3 章 膜法海水淡化工程材料

3.1 膜法海水淡化技术及装备简介	80
3.1.1 膜法预处理技术及装备	80
3.1.2 膜法脱盐技术及装备	82
3.2 功能膜材料	87
3.2.1 超滤膜材料	87
3.2.2 反渗透膜材料	101
3.2.3 纳滤膜材料	110
3.2.4 新型膜材料及未来发展趋势	113
3.3 其他膜法海水淡化工程材料	128
3.3.1 高压泵、增压泵、能量回收装备材料	128
3.3.2 低压管路	135
3.3.3 高压管路	136
3.3.4 阀门	137
3.3.5 膜壳	137
3.3.6 未来发展趋势	138
3.4 工程案例	140
3.4.1 澳大利亚珀斯反渗透海水淡化工程	140
3.4.2 华能玉环反渗透海水淡化工程	142
参考文献	146

第 4 章 海水化学资源利用装备与材料

4.1 海水化学资源利用技术简介	149
4.1.1 海水制盐	150
4.1.2 海水卤水提溴	151
4.1.3 海水卤水提钾	151
4.1.4 海水卤水提镁	151
4.1.5 海水卤水微量元素提取	152
4.1.6 海水卤水资源综合利用技术	152
4.2 海水化学资源利用工艺及装备	152

4.2.1 传统海水制盐装备	152
4.2.2 海水提溴工艺及装备	165
4.2.3 海水提镁工艺及装备	174
4.2.4 海水提钾工艺及装备	180
4.2.5 提取其他微量元素工艺及装备	185
4.3 海水化学资源提取装备选材及腐蚀防护技术	190
4.3.1 金属在卤水或盐溶液中的腐蚀特点	190
4.3.2 耐腐蚀金属材料	192
4.3.3 防腐衬里	195
4.3.4 防腐涂层	196
4.3.5 电化学保护	197
4.3.6 其他非金属材料	197
参考文献	198

第 5 章 海水直接利用装备与材料

5.1 海水冷却装备与材料	201
5.1.1 海水冷却技术及装备简介	201
5.1.2 海水冷却系统中常见的腐蚀类型	208
5.1.3 海水冷却系统中腐蚀的影响因素	210
5.1.4 金属材料在海水体系中的腐蚀行为	212
5.1.5 海水换热器(凝汽器)腐蚀及防腐措施	221
5.1.6 海水冷却塔腐蚀及防腐措施	223
5.1.7 海水管线腐蚀及防腐措施	224
5.1.8 海水泵腐蚀及防腐措施	225
5.1.9 海水阀腐蚀及防腐措施	226
5.1.10 工程案例	227
5.2 电厂海水烟气脱硫技术、装备与材料	238
5.2.1 技术及装备简介	238
5.2.2 吸收塔法海水烟气脱硫装备与材料	241
5.2.3 膜吸收法海水烟气脱硫装备与材料	244
5.3 海水直接利用新技术及装备材料	245
5.3.1 海水源热泵技术	245
5.3.2 深海水利用技术	249
5.4 海水直接利用技术发展趋势	252
5.4.1 全面提升海水药剂环境友好化水平	252
5.4.2 大力推进关键装备研发与产业化	252
5.4.3 拓展应用领域,提高应用规模	252
5.4.4 建立、完善政策法规与技术标准体系	252

参考文献	252
第 6 章 工业含盐废水处理装备与材料	
6.1 含盐工业废水现状简介	255
6.2 反渗透废水处理技术及其膜材料	256
6.2.1 反渗透废水处理技术特点	256
6.2.2 废水处理反渗透膜及膜组件	257
6.2.3 反渗透废水处理技术应用领域	259
6.2.4 高性能膜材料未来发展趋势	263
6.3 蒸馏浓缩零排放技术装备及其选材	265
6.3.1 蒸馏浓缩零排放技术特点	265
6.3.2 蒸馏浓缩零排放工艺及装备	265
6.3.3 关键装备的选材	268
6.3.4 未来发展趋势	272
6.4 膜蒸馏技术及装备材料	273
6.4.1 膜蒸馏技术废水处理特点	273
6.4.2 膜蒸馏废水处理工艺流程	273
6.4.3 膜蒸馏用憎水膜材料	278
6.4.4 膜蒸馏组件	281
6.4.5 存在问题和未来发展趋势	285
6.5 正渗透含盐废水处理技术及材料	285
6.5.1 正渗透废水处理技术特点	285
6.5.2 正渗透工艺流程	286
6.5.3 正渗透膜材料	289
6.5.4 正渗透膜未来发展趋势	296
6.6 电容去离子技术装备及电极材料	297
6.6.1 电容去离子技术特点	297
6.6.2 电容去离子工艺及装备	298
6.6.3 电极材料	299
6.6.4 未来发展趋势	304
参考文献	305
索引	309

第 | 章

海水资源综合利用工程概述

- 1.1 海水资源综合利用的战略地位和发展前景
- 1.2 我国海水资源利用技术发展概述
- 1.3 新材料对海水利用产业发展的促进作用

1.1 海水资源综合利用的战略地位和发展前景

1.1.1 水危机

水是生命的摇篮，是人类赖以生存和生产不可缺少的基本物质，是地球上不可替代的最宝贵基础资源，更是生态环境的控制要素之一。同时，水资源也是战略性的经济资源，是一个国家综合国力的有机组成部分。在过去的几十年间，随着全球人口数量不断增长以及世界经济尤其是第三世界经济的快速发展，城市化进程加快，水资源短缺已经成为许多国家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^[1]。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过度开发和利用，已经导致了严峻的生态后果，全世界 1/5 的淡水鱼群已经或濒临绝迹，世界最长的 20 条河流均遭到大坝拦截。而且，水资源短缺也成为地区局势紧张的一个主要根源。全世界过去 50 年，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。在亚洲，印度和巴基斯坦因印度河水分分配份

额而引起纷争；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愈演愈烈。

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。”^[2]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。

1.1.2 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，近 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，这部分淡水不到全球水资源总量的 0.30%（见图 1-1）^[3]。

表 1-1 全球水资源分布情况^[4]

水资源		分布面积/ km^2	水量/ km^3	占淡水储量比例/%	占总水储量比例/%
大洋、海、海湾		831069000	1338000000	—	96.5
冰盖、冰川、永久雪层		14946297	24064000	68.7	1.74
地下水		14534646	23400000	—	1.7
1	地下淡水	6539814	10530000	30.1	0.76
2	地下咸水	7994832	12870000	—	0.94
土壤水分		10250	16500	0.05	0.001
地下冰、永冻土		186330	300000	0.86	0.022
湖泊		109566	176400	—	0.013
1	淡水湖	56518	91000	0.26	0.007
2	咸水湖	53049	85400	—	0.006
大气水		8013	12900	0.04	0.001
沼泽水		7125	11470	0.03	0.0008
河流		1318	2120	0.006	0.0002
生物质水		696	1120	0.003	0.0001
总量		860842500	1386000000	—	100

此外，全球淡水资源空间分布也极不平衡。例如，南美人口占全球人口的 5%，却拥有世界河流径流量的 25%；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%；北非和中东各国的人均占有量更低。近几十年来，由于经济快速发展和人口数量增加，各大洲的人均水资源占有量均呈现下降趋势，严重缺水地区的面积在不断扩大。按照联合国教科文组织主持制定的水资源标准：人均水资源低于 3000 m^3 为轻度缺水，低于 2000 m^3

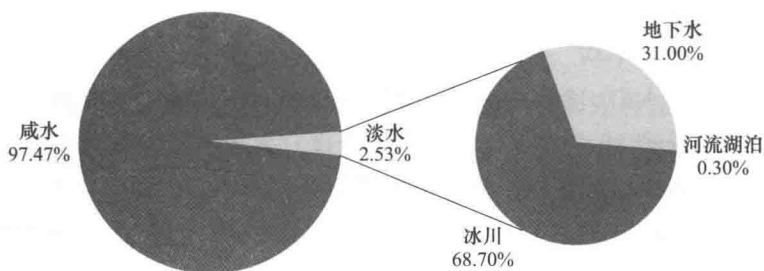


图 1-1 地球水资源分布

为中度缺水，低于 1000m³ 为重度缺水，低于 500m³ 为极度缺水，300m³ 为维持当地可持续发展的最低水资源量，即适当人口生存的最低标准^[1]。以此标准，在 20 世纪 80 年代，严重缺水地区主要集中在北非、中东的一些国家；而到 2000 年时人均水资源占有量不足 1000m³ 的地区已经扩大到亚洲部分地区；到 2015 年，除了美洲和大洋洲的少数区域外，全球大部分国家和地区均将处于缺水状态^[5]。

1.1.3 我国水资源概况

据统计，我国水资源总量近 2.84 万亿立方米，淡水资源总量少于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印度尼西亚，居世界第六位，但我国人均水资源量仅为世界平均水平的 28%，排名在第 110 名之后，是全球人均水资源最贫乏的国家之一^[6]。同时，我国也是世界上用水量最多的国家之一，且用水量呈逐年上升趋势。表 1-2 列出了我国近几年用水量数据，全国淡水取用量由 2004 年的 5547.8 亿立方米，增加到 2013 年的 6183.4 亿立方米，增长幅度超过 10%，人均用水量也逐年提高^[7]。

表 1-2 近几年全国用水情况统计^[7]

年份	农业 /亿立方米	工业 /亿立方米	其中:直流 火(核)电	生活 /亿立方米	生态环境 /亿立方米	总计 /亿立方米	人均用水量/ m ³
2004 年	3585.7	1228.9	—	651.2	82.0	5547.8	427
2005 年	3580.0	1285.2	—	675.1	92.7	5633.0	432
2006 年	3664.4	1343.8	—	693.8	93.0	5795.0	442
2007 年	3598.5	1404.1	—	710.4	105.7	5818.7	442
2008 年	3663.4	1397.1	—	729.2	120.2	5909.9	446
2009 年	3723.1	1390.9	—	748.2	103.0	5965.2	448
2010 年	3689.1	1447.3	—	765.8	119.8	6022.0	450
2011 年	3743.6	1461.8	437.5	789.9	111.9	6107.2	454
2012 年	3902.5	1380.7	451.1	739.7	108.3	6131.2	454
2013 年	3921.5	1406.4	495.2	750.1	105.4	6183.4	456

我国水资源分布具有以下特点:

(1) 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, 呈南多北少的格局, 且水资源分布与人口、耕地、矿产和经济的分布不相匹配。按照联合国教科文组织的水资源标准, 我国目前有 16 个省(自治区、直辖市)人均水资源量(不包括过境水)低于重度缺水线, 有 6 个省、自治区(宁夏、河北、山东、河南、山西、江苏)人均水资源量低于 500m^3 , 属于极度缺水地区, 大连、天津、青岛、烟台等地人均水资源量甚至不到 200m^3 [6]。

此外, 按照维系地区环境、生态用水的水资源标准: 地表径流深大于 250mm 为适宜人类社会经济系统发展, 地表径流深介于 $150\sim 250\text{mm}$ 能够较好地维系当地自然生态系统, 地表径流深低于 150mm 为生态缺水地区。我国正常年份全国缺水 500 亿立方米, 枯水年份缺口更大, 尤其是北方许多地区的水资源量均已低于最低限度, 仅靠当地水资源已难以维系生态环境需求和可持续发展[8]。

(2) 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。2013 年, 我国 I~III 类水河长比例为 68.6%, 但多集中在西南和西北诸河区, 珠江区、东南诸河区水质为良, 长江区、松花江区水质为中, 黄河区、辽河区、淮河区水质为差, 海河区水质为劣。对全国开发利用程度较高和面积较大的 119 个主要湖泊共 2.9 万平方千米水面进行的水质评价结果显示, 总体水质为 I~III 类的湖泊仅占 31.9%, IV~V 类湖泊占 42.0%, 劣 V 类湖泊占比达到 26.1%[6]。由于污染, 中国水质型缺水的城市数量呈上升趋势, 严重缺水的城市从原来的华北地区已蔓延到南方地区。水质型缺水与本已存在的资源型缺水彼此叠加, 使中国缺水状况雪上加霜。

(3) 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, 进一步增大了对地下水的开采需求。然而, 地下水作为水资源的一种自然储备形式, 一旦不适当开采或超量开采而又得不到回补, 势必造成地下水位大幅下降、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。另外, 地下水位的下降还会增大地表工业废水与生活污水的渗入, 进一步污染地下水源, 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。

对华北平原包括北京、天津、河北三省(市)全部平原及河南、山东省黄河以北平原(调查面积共 13.9 万平方千米)的地下水资源调查结果显示, 华北平原地下水污染问题较为严重, 在天津、石家庄、唐山以及德州等城市周边及工矿企业周围的地下水中, 存在汞、铬、镉、铅等重金属超标现象, 而在北京南部郊区、河北省石家庄等部分城市周边、山东省济南地区—德州东部、河南省豫北平原等地区的地下水中, 存在较为严重的苯、四氯化碳、三氯乙烯等有机物污染。而且, 华北平原地下水污染呈现持续恶化趋势, 严重威胁到上述地区的地下水饮用安全[9]。

(4) 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