



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书

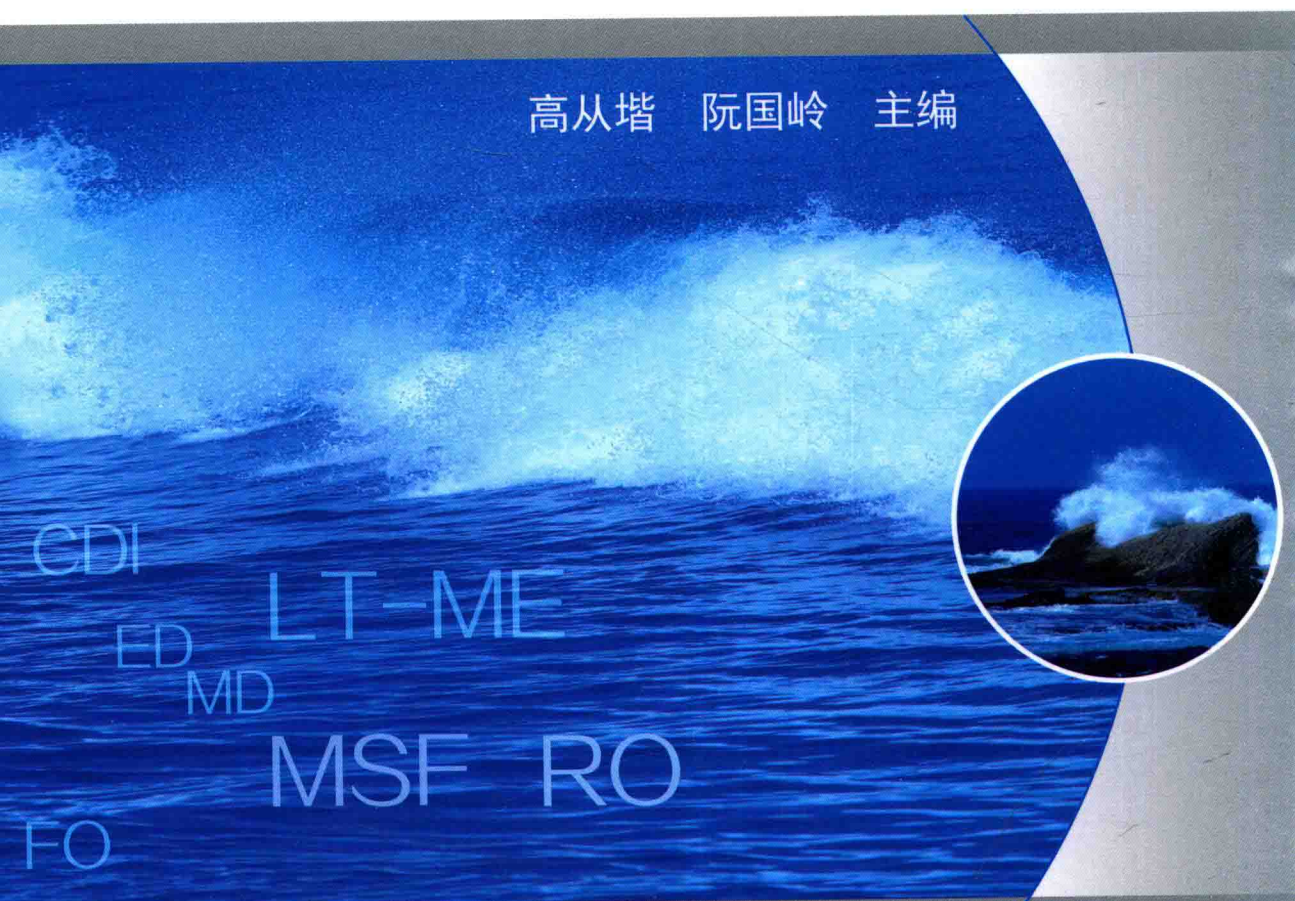


化学工业出版社学术著作出版基金资助出版

# 海水淡化技术与工程

SEAWATER DESALINATION TECHNOLOGY AND ENGINEERING

高从堦 阮国岭 主编



CDI

ED

MD

LT-ME

MSF RO

FO



化学工业出版社



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书



化学工业出版社学术著作出版基金资助出版

# 海水淡化技术与工程

SEAWATER DESALINATION TECHNOLOGY AND ENGINEERING

高从堦 阮国岭 主编

CDI

ED

MD

FO

LT-ME

MSF RO



化学工业出版社

· 北京 ·

海水淡化是解决我国水资源短缺的重要途径和战略选择,也是确保国家安全和可持续发展的必然要求。本书在介绍水资源、膜分离、传热、传质知识的基础上,对热法和膜分离技术的各种过程和工艺做了重点阐述,内容包括海水淡化工程水预处理技术,热法淡化技术与工程,反渗透和纳滤淡化技术与工程,电渗析淡化技术与工程,核能、太阳能和风能淡化技术与工程,集成海水淡化技术与过程优化和其他淡化技术,系统总结了这些技术近年来的创新进展。此外,还结合社会对海水淡化的饮用水生产和环境影响的关注,对海水淡化后处理、海水淡化后浓海水综合利用、海水淡化对环境的影响及评价与对策等做了详尽阐述,针对海水淡化存在的问题,指出了海水淡化技术和产业的发展方向。

本书汇集了国内海水淡化领域权威专家和单位在科学研究和工程实践方面的诸多成果,凝结了他们的智慧和经验,既提供了一手的工程数据也兼顾了理论基础和前沿,全面呈现了海水淡化领域的技术与工程现状。本书可供海水淡化领域的研发人员、工程技术人员、环境保护技术人员、管理人员参考阅读,也可作为高等院校资源环境、化学工程等学科的教学参考书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

海水淡化技术与工程/高从堦,阮国岭主编. —北京:  
化学工业出版社, 2015. 4  
ISBN 978-7-122-22837-6

I. ①海… II. ①高…②阮… III. ①海水淡化-  
海洋工程 IV. ①P747

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第014403号

---

责任编辑:傅聪智 路金辉  
责任校对:吴静

装帧设计:刘丽华

---

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)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张44 $\frac{3}{4}$  字数1134千字 2016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:198.00元

版权所有 违者必究



# 《海水淡化技术与工程》

## 编写人员名单

主 编 高从堦 阮国岭

编写人员 (以姓氏汉语拼音为序)

楚树坡 冯厚军 高从堦 高学理 葛云红 何 涛 纪志永 姜 标 金可勇  
李保安 李春霞 李 洪 李雪梅 吕庆春 齐春华 任建波 阮国岭 沈炎章  
谭永文 王海增 王宏涛 王 军 王志宁 吴水波 伍联营 谢春刚 谢英惠  
徐 佳 徐 克 杨 波 袁俊生 张林栋 张 铭 张维润 赵河立 郑宏林  
周 勇

## 编写分工

第 1 章 高从堦

第 2 章 谭永文、沈炎章、杨波、徐佳

第 3 章 阮国岭、齐春华、谢春刚

第 4 章 高从堦、周勇、谭永文、杨波

第 5 章 张维润、金可勇

第 6 章 吕庆春、任建波

第 7 章 赵河立、伍联营、徐克、张铭

第 8 章 高从堦、李保安、何涛、李雪梅、王宏涛、李春霞、姜标

第 9 章 阮国岭、冯厚军、葛云红、楚树坡、吴水波

第 10 章 袁俊生、纪志永、王军、李洪、张林栋、谢英惠

第 11 章 高从堦、王海增、郑宏林、高学理、王志宁

## 参编单位

杭州水处理技术研究开发中心

国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

天津大学

中国海洋大学

河北工业大学

中国科学院上海高等研究院

浙江工业大学

# 前言

## FOREWORD

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。水资源匮乏正日益影响着生态环境以及全球社会经济的发展。随着我国经济社会的快速发展和城市化进程的不断推进，水资源短缺已成为制约我国社会经济可持续发展的重要因素。海水淡化是从源头增加水资源量的有效手段，是解决我国水资源短缺的重要途径和战略选择，也是确保国家安全和可持续发展的必然要求。

海水淡化技术近年来发展迅猛，在各个领域都有不小的创新进展，如：膜法的反渗透膜的进步、膜组器技术的不断发展、关键设备的不断改进和工艺过程的持续开发等；热法的MSF和MED单机容量扩大，新型防垢剂、廉价材料的选用，采用热泵、水电联产和热膜耦合等；海水淡化集成过程和工艺优化；其他新过程方面，如电渗析、电容吸附、膜蒸馏、正渗透、水合和冰冻法等。这些技术进展进一步增加了海水淡化的发展潜力。2014年世界上脱盐水产量约 $8.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$ ，解决了2亿多人口的供水和区域发展问题，海水淡化能耗降到 $3 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ，淡化水成本在0.5美元/ $\text{m}^3$ 左右。

同时，海水淡化的带动作用是非常显著的：一是海水淡化技术的发展带动了材料、装备制造、自动化等产业的发展；二是海水淡化发展起来的新型蒸发技术和各种膜技术等促进了信息、电力、化工、生物工程、医药（疗）、冶金和环保等领域的技术进步。这些技术作为节能减排、清洁生产、提升传统产业及环境保护的重要手段，获得了重大的经济效益、社会效益和生态效益回报。

目前，海水淡化的发展在技术的先进性和可靠性、运行和管理、能耗和成本、投资和效果、环境影响等方面还存在不少问题，尽力开发新材料和新工艺、采用先进的集成技术和过程优化，是海水淡化技术和产业发展的努力方向。

国家的政策是海水淡化发展的保证，从规划、研究开发及平台建设、人才培养、工程技术和装备制造的发展、产业化和产业链、相关标准等都要有相应政策的支持。“十二五”期间我国继续加大海水淡化的技术和资金投入，加快海水淡化这一战略性新兴产业的培育和健康发展。2012年8月发布的《海水淡化科技发展“十二五”专项规划》阐明了海水淡化科技今后5年的发展思路和原则、发展目标、重点任务、能力建设和保障措施，为从事海水淡化的科技人员指明了工作方向。

基于社会的需求、政府的支持，为进一步推动海水淡化技术的发展，系统总结近十年来海水淡化技术的创新进展，特编写了本书。本书分11章，既有膜分离、传热、传质的基础知识介绍，也有热法和膜分离技术的各种过程和工艺的较深层的阐述；既有对大量资料 and 数据的认真汇总分析，也有相关简明图表和照片的配合增效；不仅详细介绍了一些新过程，而且充分回答了社会关注的热点。

本书对反渗透法、热法（多级闪蒸、低温多效）、电渗析和其他淡化新过程等方面的重大技术进展进行了重点而又系统的阐述，如：如反渗透膜在膜和组器技术、高压泵和能量回

收等关键设备、多种工艺过程和大型工程等；热法在单机容量扩大、新型传热和结构材料的选用、水电联产、热膜耦合和其他集成工艺等；电渗析在高性能离子交换膜、双极膜、电脱离子和浓缩分离等；其他淡化新过程，如电容吸附、膜蒸馏、正渗透和冰冻法的新进展等。此外，还结合社会对海水淡化的饮用水生产和环境影响的关注，对可再生能源利用（核能、太阳能和风能）、海水淡化集成过程（淡化方法之间的集成、电水联产和综合利用）、海水淡化后处理（矿化、pH调节、缓蚀、加氟、消毒、脱硼和深度脱盐等）、海水综合利用（制盐、提钾、提溴、制镁、提锂、提铀和提重水等）、环境的影响与对策（能耗、浓海水排放、预处理和化学清洗用药剂、腐蚀产物和固体废弃物、取排水机械作用、占地和噪声以及评价和对策）等方面专门安排了章节进行了较详尽的阐明。同时，针对海水淡化发展存在的不少问题，指出海水淡化技术和产业发展的努力方向。

本书作者来自国内从事海水淡化技术和工程的知名单位，如杭州水处理技术研究开发中心、国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所、天津大学、中国海洋大学和河北工业大学等，均在海水淡化领域工作多年，有丰富的相关知识和工程实践经验。本书汇聚了这些作者和单位在海水淡化科学研究和工程实践方面的诸多成果，其中的许多技术在国内居于领先水平。本书在编写的过程中既突出科学性和先进性，也注重实用性和可读性，从各种海水淡化技术的基础原理和工艺过程的深层阐述，到各种关键设备和不同规模工程的清楚介绍，从各种技术的发展和展望，到社会关注热点的仔细评说……使本书内容更易为读者理解和掌握。

希望本书出版发行后，能为读者喜欢，供海水淡化、膜科学与技术以及相关领域的学者、工程技术人员、管理人员、研究生和其他人员参考，为推动我国海水淡化技术与工程的进步和扩大其应用尽一份力量。

高从塔  
2014年12月

## 符 号 表

符号	物理意义	单位
$A/F$	面积	$m^2$
$AI$	侵蚀指数	
$Alk$	碱度	mg/L, 以 $CaCO_3$ 计
$BPE$	沸点升	$^{\circ}C$
$C$	单位价格	
$CCPP$	碳酸钙沉淀势	mg/L, 以 $CaCO_3$ 计
$C_p$	定压比热容	$J/(kg \cdot K)$
$C_r$	压缩比	
$C_T$	总溶解无机碳	
$D$	体积流量	$m^3/s$
$F'$	比传热面积	$m^2 \cdot h/kg$
$G/M/m$	质量流量	kg/h
$H$	焓	J
$k/U$	传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
$LR$	Larson 比率	
$LSI$	Langelier 饱和指数	
$p$	压力	kPa
$PR$	造水比	
$Q$	热量	J
$q$	热流密度	$J/(m^2 \cdot h)$
$r$	半径	m
$R_a$	动力蒸汽量	kg
$Ra$	引射系数	
$R_f$	污垢热阻	$K \cdot m^2/W$
$RSI$	Ryznar 稳定指数	
$SHMP$	六偏磷酸钠	
$T$	温度	K
$TH$	总硬度	mg/L, 以 $CaCO_3$ 计
$TTD$	传热温差	K
$X$	盐度	g/kg
$\eta$	动力黏度	$kg/(m \cdot s)$
$\lambda$ 或 $\theta$	热导率	$W/(m^2 \cdot K)$

# 目录

## CONTENTS

### 第1章 世界水资源和海水淡化

1.1 水资源概况	1	1.3.1 海水淡化技术概况	15
1.1.1 世界水资源概况	1	1.3.2 海水淡化理论耗能量	15
1.1.2 我国水资源概况和用水紧张状况	2	1.3.3 海水淡化的简要发展历史	17
1.2 海水的组成和性质	4	1.3.4 主要海水淡化方法简介	18
1.2.1 海水组成	4	1.3.4.1 蒸馏法	18
1.2.2 海水性质	7	1.3.4.2 反渗透法	20
1.2.2.1 海水氯度与盐度	7	1.3.4.3 电渗析法	20
1.2.2.2 海水密度和1980年国际标准 海水状态方程	9	1.3.4.4 冷冻法	21
1.2.2.3 海水恒压比热容	11	1.3.4.5 水合物法	21
1.2.2.4 海水冰点	11	1.3.4.6 电容吸附法	21
1.2.2.5 海水渗透压	12	1.3.4.7 嵌镶离子交换膜压渗析	22
1.2.2.6 海水蒸气压	12	1.3.4.8 溶剂萃取法	22
1.2.2.7 海水沸点升高	12	1.3.4.9 膜蒸馏	22
1.2.2.8 海水黏度	13	1.3.4.10 正渗透	23
1.2.2.9 海水绝对电导率	13	1.3.4.11 海水淡化方法的集成	24
1.2.2.10 海水表面张力	13	1.3.5 淡化技术在水资源利用中的地位和 发展前景	24
1.2.2.11 海水中的溶解气体	14	参考文献	25
1.3 海水淡化技术概述	14		

### 第2章 海水淡化工程原水预处理技术

2.1 预处理的目与内容	26	2.4.1.1 水中悬浮颗粒和胶体颗粒的 稳定性	31
2.2 淡化工程原水采集方法	27	2.4.1.2 胶体微粒的脱稳	32
2.2.1 海水水源选择的几点要求	28	2.4.1.3 混凝过程	32
2.2.2 海水取水位置的选择	28	2.4.2 影响混凝效果的主要因素	33
2.2.3 海水取水构筑物	28	2.4.3 混凝剂和助凝剂的适用条件和 投加量	33
2.2.4 海水取水构筑物形式与适用条件	28	2.4.4 混凝剂和助凝剂的配制、投加和 混合	34
2.3 预处理常用药剂	31	2.4.4.1 工艺流程	34
2.3.1 海水预处理药剂选用原则	31	2.4.4.2 配制	35
2.3.2 海水预处理常用药剂的分类和应用	31		
2.4 原水混凝沉降除浊技术	31		
2.4.1 混凝原理与过程	31		



2.4.4.3 计量投加 .....	35	2.7 原水软化与阻垢技术 .....	60
2.4.4.4 混合 .....	35	2.7.1 化学反应沉淀软化法 .....	60
2.4.5 絮凝 .....	36	2.7.2 离子交换法 .....	61
2.4.5.1 絮凝效果 G 值计算 .....	37	2.7.3 酸化法 .....	62
2.4.5.2 絮凝池设计要点 .....	37	2.7.4 加入阻垢分散剂法 .....	63
2.4.5.3 絮凝反应设备 .....	37	2.7.5 纳滤法膜软化 .....	63
2.4.6 混凝沉淀 .....	40	2.8 原水脱气技术 .....	64
2.4.6.1 平流沉淀池 .....	40	2.8.1 酸化脱气——脱 CO <sub>2</sub> 气 .....	64
2.4.6.2 斜管沉淀池 .....	41	2.8.2 加热脱气 .....	64
2.4.7 澄清 .....	42	2.8.3 真空脱气 .....	64
2.5 原水过滤除浊技术 .....	43	2.8.4 除氧剂脱氧气 .....	65
2.5.1 格栅和格网 .....	44	2.8.5 脱 H <sub>2</sub> S 气 .....	65
2.5.2 滤料过滤 .....	44	2.9 原水除铁和锰的技术 .....	65
2.5.2.1 一级滤料过滤设备 .....	44	2.9.1 混凝沉淀法 .....	65
2.5.2.2 二级滤料过滤设备 .....	45	2.9.2 曝气氧化法 .....	65
2.5.2.3 微絮凝滤料过滤 .....	46	2.9.3 氯氧化法 .....	66
2.5.3 膜法海水淡化预处理技术 .....	46	2.9.4 接触氧化法 .....	66
2.5.3.1 微滤(MF)技术 .....	46	2.9.5 铁细菌除铁法 .....	66
2.5.3.2 超滤(UF)技术 .....	48	2.10 原水除余氯技术 .....	66
2.5.3.3 纳滤(NF)技术 .....	51	2.11 原水除有机物、异臭和异味 .....	66
2.5.3.4 膜法预处理的膜污染问题 .....	52	2.12 原水预处理工艺流程 .....	67
2.5.4 吸附过滤 .....	53	2.12.1 电渗析法淡化原水预处理工艺流程 .....	67
2.5.4.1 活性炭过滤器反洗再生步骤 .....	54	2.12.1.1 地下水电渗析法淡化原水 预处理工艺流程 .....	67
2.5.4.2 活性炭其他再生方法 .....	54	2.12.1.2 河水电渗析预处理工艺流程 .....	67
2.6 原水灭菌杀生技术 .....	55	2.12.1.3 苦咸水及海水电渗析预处理 工艺流程 .....	67
2.6.1 D 值 .....	55	2.12.2 反渗透法淡化原水预处理工艺 流程 .....	68
2.6.2 消毒剂分类 .....	55	2.12.2.1 苦咸水反渗透预处理工艺 流程 .....	68
2.6.3 氯消毒剂消毒 .....	56	2.12.2.2 海水反渗透预处理工艺流程 .....	68
2.6.3.1 有效氯和余氯 .....	56	2.12.3 蒸馏法淡化原水预处理工艺流程 .....	70
2.6.3.2 液氯灭菌消毒杀藻系统 .....	56	2.13 淡化技术的原水预处理后的 水质要求 .....	70
2.6.3.3 次氯酸钠消毒系统 .....	57	参考文献 .....	71
2.6.3.4 二氧化氯消毒 .....	58		
2.6.4 臭氧消毒 .....	59		
2.6.5 紫外线消毒 .....	60		
2.6.6 过氧乙酸消毒 .....	60		
2.6.7 超滤和微滤除菌 .....	60		

### 第 3 章 热法海水淡化

3.1 蒸馏法 .....	73	3.1.2.2 热力学第一、第二定律 .....	74
3.1.1 概述 .....	73	3.1.2.3 沸腾和沸点升 .....	76
3.1.2 蒸馏过程基本原理 .....	74	3.1.2.4 传热 .....	78
3.1.2.1 温度 .....	74	3.1.2.5 蒸馏过程结垢 .....	79

3.1.2.6	蒸馏过程的腐蚀与侵蚀	80	低温多效海水淡化装置	171
3.1.2.7	捕沫	80	3.1.9.3 沙特阿拉伯 Shoaiba 电厂 880000t/d	
3.1.3	单效蒸馏	80	多级闪蒸海水淡化装置	173
3.1.3.1	单效蒸馏	80	3.1.10 蒸馏淡化技术展望	173
3.1.3.2	带有蒸汽喷射器的单效蒸馏	88	<b>3.2 冷冻法淡化技术</b>	<b>175</b>
3.1.4	多效蒸馏	93	3.2.1 冷冻法淡化发展历程	175
3.1.4.1	原理及技术特点	93	3.2.1.1 早期冷冻法淡化技术	175
3.1.4.2	多效蒸馏常见进料工艺	95	3.2.1.2 现代冷冻法淡化技术	176
3.1.4.3	多效蒸馏工艺设计	111	3.2.2 冷冻法淡化原理	178
3.1.4.4	主要部件设计	114	3.2.2.1 冷冻淡化原理	178
3.1.4.5	材质的选择	129	3.2.2.2 盐分排泄运动	179
3.1.4.6	系统的三维设计	129	3.2.2.3 海水浓缩率	180
3.1.5	压汽蒸馏	131	3.2.2.4 海水中杂质的去除	180
3.1.5.1	单效压汽蒸馏 (SEE-MVC)	132	3.2.3 海水冷冻淡化工艺	180
3.1.5.2	压汽蒸馏装置工艺计算	139	3.2.3.1 概述	180
3.1.6	多级闪蒸	140	3.2.3.2 冷能制取方式	181
3.1.6.1	多级闪蒸原理与流程	140	3.2.3.3 冰晶生成	183
3.1.6.2	技术特点和发展趋势	142	3.2.3.4 分离与净化	184
3.1.7	蒸馏淡化装备	142	3.2.3.5 冰晶融化	186
3.1.7.1	低温多效蒸馏海水淡化装备	142	3.2.3.6 冰融水深度脱盐	187
3.1.7.2	压汽蒸馏海水淡化装备	153	3.2.3.7 冷冻淡水的利用	187
3.1.7.3	多级闪蒸海水淡化装备	153	3.2.4 冷冻法淡化技术分类	187
3.1.8	蒸馏淡化共性技术	157	3.2.4.1 自然冷冻淡化技术	188
3.1.8.1	电气、控制与仪表	157	3.2.4.2 人工冷冻淡化技术	190
3.1.8.2	装置加工制造	162	3.2.5 冷冻法淡化技术优缺点分析	196
3.1.8.3	工程实施	166	3.2.5.1 技术宏观分析	196
3.1.9	蒸馏淡化工程典型案例	169	3.2.5.2 方法性能比较	196
3.1.9.1	北疆发电厂 10 万吨/日低温多效蒸馏海水淡化工程	169	<b>参考文献</b>	<b>197</b>
3.1.9.2	印度尼西亚 Indramayu 电厂 2×4500t/d			

## 第 4 章 反渗透和纳滤海水淡化

<b>4.1 概述</b>	<b>200</b>	4.2.1.3 形成氢键模型	205
4.1.1 发展概况	200	4.2.1.4 Donnan 平衡模型	205
4.1.2 渗透和反渗透	201	4.2.1.5 其他分离模型	206
4.1.3 反渗透和纳滤膜及组器	202	4.2.2 纳滤的分离机理	206
4.1.4 反渗过程的特性和应用	202	4.2.2.1 Donnan 平衡模型	206
4.1.5 纳滤过程的特性和应用	202	4.2.2.2 固定电荷模型	207
<b>4.2 反渗透和纳滤的分离机理</b>	<b>202</b>	4.2.2.3 空间电荷模型	207
4.2.1 反渗透的分离机理	202	<b>4.3 反渗透膜和纳滤膜的制备</b>	<b>207</b>
4.2.1.1 溶解扩散模型	202	4.3.1 膜材料	207
4.2.1.2 优先吸附-毛细孔流动模型	204	4.3.1.1 主要膜材料及其发展概况	207

4.3.1.2 膜材料的选择 .....	208	4.7.1.5 SiO <sub>2</sub> 沉淀的控制 .....	263
4.3.2 膜的分类 .....	210	4.7.1.6 有机物的去除 .....	264
4.3.3 非对称膜反渗透膜的制备和 成膜机理 .....	210	4.7.1.7 常见的预处理系统 .....	264
4.3.3.1 制膜液 .....	210	4.7.2 反渗透和纳滤装置 .....	265
4.3.3.2 溶剂蒸发 .....	212	4.7.2.1 单组件反渗透或纳滤装置 .....	266
4.3.3.3 凝胶过程 .....	213	4.7.2.2 多组件反渗透或纳滤装置 .....	267
4.3.3.4 热处理 .....	214	4.7.3 辅助设备和主要零部件 .....	268
4.3.4 复合反渗透膜的制备和成膜机理 .....	215	4.7.3.1 停机冲洗系统 .....	268
4.3.5 不同构型的膜的制备 .....	218	4.7.3.2 清洗灭菌装置 .....	269
4.4 反渗透膜和纳滤膜结构和 性能表征 .....	219	4.7.3.3 能量回收装置 .....	269
4.5 反渗透膜和纳滤膜组器技术 .....	220	4.7.3.4 高低压设备和部件 .....	272
4.6 反渗透和纳滤海水淡化工艺 过程设计 .....	228	4.7.3.5 有关仪表 .....	274
4.6.1 系统设计要求 .....	228	4.7.4 设备的操作与维修 .....	274
4.6.2 浓差极化 .....	229	4.7.4.1 元件装配和取换 .....	274
4.6.2.1 浓差极化现象 .....	229	4.7.4.2 启动、记录和停运 .....	275
4.6.2.2 浓差极化计算 .....	230	4.7.4.3 查找故障 .....	277
4.6.2.3 浓差极化下的传质方程 .....	230	4.7.5 清洗、再生、消毒和存放技术 .....	278
4.6.2.4 浓差极化对反渗透的影响和降低 浓差极化的途径 .....	231	4.7.5.1 膜的清洗 .....	278
4.6.3 溶度积和饱和度 .....	231	4.7.5.2 膜的再生 .....	281
4.6.4 过程基本方程式 .....	231	4.7.5.3 膜元件的消毒 .....	281
4.6.5 工艺流程及其特征方程 .....	235	4.7.5.4 膜元件的存放 .....	282
4.6.5.1 连续式一分段式(浓水分段) .....	235	4.7.5.5 清洗、消毒装置 .....	282
4.6.5.2 连续式一分级式(产水分级) .....	237	4.7.6 计算机监控 .....	283
4.6.5.3 部分循环式一部分透透水循环 .....	238	4.7.6.1 概述 .....	283
4.6.5.4 部分循环式一部分浓缩液循环 .....	239	4.7.6.2 制水系统 .....	284
4.6.5.5 循环式—补加稀释剂的浓缩 液循环 .....	240	4.7.6.3 示例 .....	285
4.6.5.6 循环式—浓缩液循环 .....	241	4.8 典型的反渗透和纳滤应用实例 .....	287
4.6.6 装置的组件配置和性能 .....	242	4.8.1 海水淡化 .....	287
4.6.6.1 膜元(组)件的操作性能 .....	242	4.8.1.1 澳大利亚珀斯反渗透海水 淡化工程 .....	287
4.6.6.2 装置组件的配置 .....	243	4.8.1.2 沙特阿拉伯 5.68 万吨/日 反渗透淡化厂简介 .....	289
4.6.6.3 装置的性能 .....	244	4.8.1.3 小型反渗透淡化器 .....	291
4.6.7 基本设计内容和过程 .....	244	4.8.2 苦咸水淡化 .....	292
4.7 反渗透和纳滤系统及运行 .....	246	4.8.2.1 15000m <sup>3</sup> /d 苦咸水淡化厂 .....	292
4.7.1 预处理系统 .....	246	4.8.2.2 中型苦咸水淡化实例 .....	293
4.7.1.1 除去悬浮固体和胶体,降低浊度 .....	246	4.8.2.3 小型苦咸水淡化装置 .....	294
4.7.1.2 微生物污染和防治 .....	248	4.9 反渗透和纳滤过程的经济性 .....	294
4.7.1.3 微溶盐沉淀的控制 .....	248	4.9.1 成本考虑的基础 .....	294
4.7.1.4 金属氧化物的控制 .....	262	4.9.2 直接投资成本 .....	294
		4.9.3 间接投资成本 .....	295
		4.9.4 操作成本 .....	296
		4.9.5 投资回收成本 .....	297
		4.9.6 评价成本的方法 .....	297

4.9.7 敏感性分析 .....	298
4.9.8 小规模和特种系统 .....	300
4.9.9 RO 代表性成本示例 .....	301

4.10 展望 .....	302
参考文献 .....	302

## 第 5 章 电渗析海水淡化

<b>5.1 概述 .....</b>	<b>305</b>	5.9.1 沙漠苦咸水淡化车 .....	344
<b>5.2 基础理论 .....</b>	<b>306</b>	5.9.2 海水淡化装置 .....	345
5.2.1 电渗析原理 .....	306	5.9.2.1 脱盐流程 .....	345
5.2.2 电渗析能耗 .....	307	5.9.2.2 脱硼 .....	347
5.2.3 Donnan 平衡理论 .....	309	5.9.3 海水浓缩制盐 .....	349
<b>5.3 离子交换膜 .....</b>	<b>310</b>	5.9.3.1 浓缩制盐流程与运行数据 .....	349
5.3.1 离子交换膜分类 .....	310	5.9.3.2 多膜堆浓缩型电渗析器 .....	350
5.3.2 离子交换膜的制备 .....	311	5.9.3.3 浓缩装置运行情况 .....	351
5.3.3 离子交换膜的性能 .....	314	5.9.3.4 最高浓缩基础计算式 .....	351
5.3.4 商品化离子交换膜 .....	316	5.9.3.5 浓缩制盐的技术要求 .....	352
<b>5.4 电渗析器 .....</b>	<b>318</b>	5.9.4 浓缩、脱盐组合工艺 .....	353
5.4.1 电渗析器的主要部件 .....	318	5.9.4.1 反渗透-电渗析-电解组合 .....	353
5.4.2 电渗析器的组装 .....	320	5.9.4.2 电渗析-离子交换膜电解组合 .....	353
5.4.3 国产电渗析器的规格和性能 .....	321	5.9.4.3 反渗透-电渗析集成海水综合利用系统 .....	354
<b>5.5 极化和极限电流密度 .....</b>	<b>322</b>	5.9.4.4 电渗析-反渗透制取高矿化度饮用水 .....	355
5.5.1 极化现象 .....	322	<b>5.10 电渗析淡化的经济性 .....</b>	<b>355</b>
5.5.2 极限电流密度及极限电流系数 .....	323	5.10.1 产水成本 .....	355
5.5.3 影响极限电流的因素 .....	326	5.10.2 经济操作电流密度 .....	356
5.5.4 极限电流密度经验式 .....	328	5.10.3 几种淡化过程的比较 .....	356
5.5.5 极限电流测定方法 .....	329	<b>5.11 电去离子(EDI)技术 .....</b>	<b>357</b>
<b>5.6 电渗析淡化工艺过程设计 .....</b>	<b>330</b>	5.11.1 工作原理 .....	357
5.6.1 基础计算式 .....	330	5.11.2 EDI 膜堆 .....	358
5.6.2 四种脱盐流程 .....	331	5.11.3 进水水质及树脂再生 .....	359
5.6.3 流程设计计算 .....	332	5.11.3.1 EDI 进水水质要求 .....	359
<b>5.7 电渗析淡化工程设计 .....</b>	<b>334</b>	5.11.3.2 离子交换树脂再生 .....	360
5.7.1 工程参数(水量)计算 .....	334	5.11.4 EDI 工艺设计 .....	360
5.7.2 进水水质要求 .....	336	5.11.4.1 EDI 装置 .....	360
5.7.3 预处理系统 .....	337	5.11.4.2 RO-EDI 纯水系统设计 .....	361
5.7.4 场地布置 .....	338	<b>5.12 双极膜过程 .....</b>	<b>362</b>
<b>5.8 电渗析系统和运行 .....</b>	<b>340</b>	5.12.1 原理 .....	362
5.8.1 操作参数的选取与调整 .....	340	5.12.2 双极膜 .....	363
5.8.2 控制沉淀物生成 .....	341	5.12.2.1 性能要求 .....	363
5.8.3 EDR 运行方式 .....	342	5.12.2.2 结构与制备 .....	363
5.8.3.1 EDR 装置工艺流程 .....	342	5.12.3 水解离 .....	364
5.8.3.2 提高原水回收率的措施 .....	343	5.12.4 膜堆 .....	366
<b>5.9 应用实例 .....</b>	<b>344</b>		

5.12.4.1 基本设计要求 .....	366	5.12.5 过程工艺 .....	368
5.12.4.2 隔室组合 .....	366	5.12.6 应用 .....	369
5.12.4.3 商品化膜堆 .....	367	参考文献 .....	372

## 第 6 章 核能、太阳能和风能海水淡化

<b>6.1 核能海水淡化 .....</b>	<b>374</b>	6.2.3 间接法太阳能海水淡化 .....	390
6.1.1 核能海水淡化系统 .....	375	6.2.3.1 非聚光太阳能集热器驱动的 海水淡化 .....	390
6.1.1.1 核能海水淡化系统结构 .....	375	6.2.3.2 聚光太阳能集热器驱动的 海水淡化 .....	392
6.1.1.2 核能海水淡化用反应堆 .....	375	6.2.3.3 太阳池驱动的海水淡化 .....	394
6.1.1.3 核能海水淡化工艺选择 .....	377	6.2.3.4 太阳能光伏驱动的海水淡化 .....	395
6.1.2 核能海水淡化工程设计 .....	378	6.2.4 太阳能海水淡化发展展望 .....	396
6.1.2.1 热电联产核反应堆耦合 海水淡化 .....	378	<b>6.3 风能海水淡化技术 .....</b>	<b>396</b>
6.1.2.2 供热核反应堆耦合海水淡化 .....	379	6.3.1 风能海水淡化技术形式 .....	396
6.1.2.3 核能海水淡化的安全设计 .....	381	6.3.2 直接风能海水淡化 .....	397
6.1.3 核能海水淡化经济性 .....	381	6.3.3 间接风能海水淡化 .....	398
6.1.4 核能海水淡化工程现状和新动向 .....	382	6.3.3.1 并网型风能海水淡化 .....	399
<b>6.2 太阳能海水淡化 .....</b>	<b>384</b>	6.3.3.2 非并网型风能海水淡化 .....	400
6.2.1 太阳能利用技术 .....	384	6.3.4 存在的技术问题及对策 .....	405
6.2.1.1 太阳能光伏发电 .....	384	6.3.4.1 技术问题 .....	405
6.2.1.2 太阳能光热利用 .....	384	6.3.4.2 技术对策 .....	406
6.2.2 直接法太阳能海水淡化 .....	387	参考文献 .....	406
6.2.2.1 被动式太阳能蒸馏器 .....	387		
6.2.2.2 主动式太阳能蒸馏器 .....	388		

## 第 7 章 集成海水淡化技术与过程优化

<b>7.1 方法本身的集成与方法之间的 集成 .....</b>	<b>408</b>	7.1.2.6 压汽蒸馏与多效蒸馏或多级 闪蒸的组合 .....	420
7.1.1 方法本身的组合 .....	409	7.1.2.7 喷雾蒸发与反渗透或低温 蒸馏的组合 .....	420
7.1.1.1 多段多级反渗透 .....	409	<b>7.2 电水联产海水淡化 .....</b>	<b>422</b>
7.1.1.2 多级连续式电渗析 .....	410	7.2.1 概述 .....	422
7.1.1.3 多效多级闪蒸 .....	412	7.2.1.1 基本概念 .....	422
7.1.2 方法之间的组合 .....	413	7.2.1.2 电水联产的优点 .....	422
7.1.2.1 热膜耦合 .....	413	7.2.1.3 电水联产的缺点 .....	423
7.1.2.2 纳滤与反渗透或多级闪蒸的 组合 .....	415	7.2.2 电水联产系统 .....	423
7.1.2.3 反渗透与电渗析的组合 .....	418	7.2.2.1 发电系统 .....	423
7.1.2.4 反渗透与电容去离子技术的组合 .....	418	7.2.2.2 淡化系统 .....	424
7.1.2.5 多级闪蒸与低温多效蒸馏的组合 .....	419	7.2.2.3 电水联产典型工艺 .....	425



7.2.3	电水联产经济性	425	7.3.2.2	海水淡化-浓水制盐、碱耦合工艺	436
7.2.3.1	蒸汽价格的确定	425	7.3.3	新型海水淡化与综合利用耦合工艺	440
7.2.3.2	电水联产的成本分摊	428	7.3.3.1	污水处理-反渗透海水淡化耦合工艺	440
7.2.3.3	电水比	429	7.3.3.2	正渗透污水浓缩耦合反渗透海水淡化工艺	443
7.2.4	典型案例	429	7.4	海水淡化过程的优化	444
7.2.4.1	富查伊拉(Fujairah)电水联产项目	429	7.4.1	过程模拟	445
7.2.4.2	沙特 Marafiq 电水联产项目	430	7.4.2	化工过程优化方法简介	446
7.2.4.3	北疆电厂	431	7.4.2.1	化工过程优化	446
7.2.5	发展趋势	431	7.4.2.2	最优化方法	446
7.3	海水淡化与综合利用	432	7.4.3	海水淡化过程的优化	448
7.3.1	海水综合利用技术基础	432	7.4.3.1	海水淡化过程优化的研究现状	448
7.3.1.1	海水直接利用	432	7.4.3.2	海水淡化过程的优化	450
7.3.1.2	海水化学资源提取	433	7.4.3.3	热膜耦合海水淡化系统的优化	460
7.3.1.3	实施海水淡化与综合利用的必要性	435	7.4.3.4	水电联产系统的优化	463
7.3.2	海水淡化与综合利用耦合工艺现状	436	参考文献		467
7.3.2.1	海水淡化-浓水梯级利用	436			

## 第 8 章 其他海水淡化技术

8.1	电(容)吸附法脱盐	472	8.3.2.2	质量传递	502
8.1.1	脱盐原理	472	8.3.3	膜材料	504
8.1.2	脱盐特性	473	8.3.3.1	概述	504
8.1.3	电吸附装置和工作过程	474	8.3.3.2	膜材料选择	508
8.1.3.1	电吸附电极材料	474	8.3.4	膜组件	510
8.1.3.2	电吸附装置	474	8.3.4.1	概述	510
8.1.3.3	电吸附系统及其工作过程	474	8.3.4.2	板式膜组件	511
8.1.3.4	电吸附装置的技术特点	475	8.3.4.3	管壳式膜组件	513
8.1.4	电吸附装置的应用实例	476	8.3.4.4	螺旋卷式膜组件	515
8.1.5	存在的问题及展望	478	8.3.4.5	膜组件设计要求	515
8.2	正渗透	478	8.3.5	膜蒸馏工艺	516
8.2.1	正渗透原理	479	8.3.5.1	膜蒸馏工艺流程	516
8.2.2	浓差极化	480	8.3.5.2	工艺参数的影响	519
8.2.3	正渗透膜材料	482	8.3.6	膜蒸馏的应用	520
8.2.4	汲取溶液	486	8.3.7	存在的问题及展望	521
8.2.5	正渗透的应用	491	8.4	其他淡化技术	522
8.2.6	膜污染	497	8.4.1	水合物法海水淡化	522
8.2.7	小结	497	8.4.2	嵌镶离子交换膜压渗析	523
8.3	膜蒸馏	498	8.4.3	冰山取水淡化	523
8.3.1	膜蒸馏简介	498	8.4.4	应急救生离子交换药剂	523
8.3.2	传热传质机理	500	8.4.5	溶剂萃取法	524
8.3.2.1	热量传递	500	参考文献		524

## 第9章 海水淡化产水的后处理

9.1 淡化水后处理的必要性	531	9.3.1.6 矿化设计实例	545
9.1.1 海水淡化水的特性	531	9.3.2 pH调节	547
9.1.1.1 蒸馏淡化水的特性	531	9.3.2.1 脱气	547
9.1.1.2 反渗透淡化水的特性	532	9.3.2.2 调整pH值	548
9.1.2 淡化水对管网的腐蚀	533	9.3.3 加缓蚀剂	549
9.1.3 淡化水饮用安全性	536	9.3.4 加氟	549
9.2 基本化学原理	537	9.3.5 消毒	550
9.2.1 碳酸盐系统	537	9.3.5.1 概述	550
9.2.2 水相-气相的相互作用	538	9.3.5.2 氯化	550
9.2.3 $H_2CO_3$ 碱度	538	9.3.5.3 氯胺	553
9.2.4 缓冲能力	538	9.3.5.4 二氧化氯	553
9.2.5 pH值	539	9.3.5.5 臭氧	554
9.2.6 碳酸钙溶解度	539	9.3.5.6 紫外线消毒	555
9.3 后处理	539	9.3.5.7 消毒方法比选	555
9.3.1 矿化技术	540	9.3.6 储存和配送	556
9.3.1.1 直接投加化学药品法	540	9.4 脱硼和深度除盐	557
9.3.1.2 掺混法	541	9.4.1 脱硼	557
9.3.1.3 石灰石溶解法	541	9.4.2 深度脱盐	558
9.3.1.4 矿化方法结合	542	参考文献	559
9.3.1.5 矿化方法比较	543		

## 第10章 海水淡化后浓海水综合利用

10.1 浓海水综合利用进展	562	10.2.3 从(浓)海水中提取钾盐	583
10.1.1 海水制盐	563	10.2.3.1 离子筛法海水提钾	584
10.1.2 海水提钾	563	10.2.3.2 其他从(浓)海水提钾 技术进展	591
10.1.3 海水提溴	564	10.2.3.3 沸石离子筛法海水提钾 工程案例	592
10.1.4 海水制镁	564	10.3 浓海水提溴	594
10.1.5 海水提锂	565	10.3.1 溴的性质	594
10.1.6 海水提铀	565	10.3.2 溴在自然界中的分布	596
10.1.7 海水提重水	566	10.3.3 制取溴素的原料	596
10.2 浓海水提钾	566	10.3.4 国内外制溴工业发展概况	597
10.2.1 概况	566	10.3.4.1 我国溴素生产概况	597
10.2.1.1 钾的概况	566	10.3.4.2 连续双过程真空提溴法	597
10.2.1.2 钾产品性状与用途	567	10.3.4.3 溴素的其他生产方法	598
10.2.2 从苦卤中提取钾盐	570	10.3.5 从浓缩卤水中提溴的方法	600
10.2.2.1 苦卤概况	570	10.3.5.1 蒸汽蒸馏法从卤水中提溴	600
10.2.2.2 兑卤法生产氯化钾	573	10.3.5.2 空气解吸法从卤水中提溴	602
10.2.2.3 苦卤生产硫酸钾	578		
10.2.2.4 苦卤提取氯化钾案例	581		

10.3.5.3 空气吹出法 .....	602	10.5.5.2 镁砂的技术标准 .....	647
10.3.6 浓海水制溴案例 .....	610	10.5.5.3 生产方法 .....	648
10.3.6.1 蒸汽蒸馏法提溴 .....	610	10.5.5.4 工艺流程选择 .....	648
10.3.6.2 空气吹出法从浓海水中提溴 ..	612	<b>10.6 其他有价值物质的利用 .....</b>	<b>649</b>
<b>10.4 浓海水制盐 .....</b>	<b>614</b>	10.6.1 浓海水提取碘 .....	649
10.4.1 盐的性质、用途、分类和组成 .....	614	10.6.1.1 碘的性状、用途 .....	649
10.4.2 浓海水制盐技术 .....	616	10.6.1.2 碘的质量标准 .....	650
10.4.2.1 日晒浓缩浓海水制盐 .....	616	10.6.1.3 碘的生产方法 .....	650
10.4.2.2 浓海水日晒法制盐生产工艺 ..	618	10.6.2 浓海水提取锂 .....	651
10.4.2.3 浓海水制盐滩田设施与 机械设备 .....	619	10.6.2.1 锂的性状、用途 .....	651
10.4.2.4 海水日晒制盐案例 .....	620	10.6.2.2 浓海水提取锂的方法 .....	652
10.4.3 工厂化浓海水制盐 .....	626	10.6.2.3 浓海水提取锂的应用及 发展趋势 .....	653
10.4.3.1 工厂化浓海水浓缩技术 .....	626	10.6.3 浓海水提取铀 .....	654
10.4.3.2 浓海水浓缩的卤水真空制盐 ..	629	10.6.3.1 铀的性状、用途 .....	654
10.4.3.3 饱和卤水真空制盐案例 .....	630	10.6.3.2 铀的生产方法 .....	654
<b>10.5 浓海水提取镁 .....</b>	<b>638</b>	10.6.3.3 海水铀吸附材料 .....	655
10.5.1 概述 .....	638	10.6.3.4 海水提铀研究进展 .....	657
10.5.2 浓海水提取氯化镁 .....	639	10.6.4 浓海水提取重水 .....	659
10.5.2.1 氯化镁性状、用途 .....	639	10.6.4.1 重水的性状、用途 .....	659
10.5.2.2 氯化镁技术标准 .....	639	10.6.4.2 重水的生产方法 .....	659
10.5.2.3 氯化镁的生产方法 .....	639	10.6.4.3 海水提取重水装置研究进展 ..	659
10.5.2.4 以提溴废液为原料提取氯化镁 ..	640	<b>10.7 浓海水资源化利用集成技术 .....</b>	<b>660</b>
10.5.2.5 案例——某地5万吨/年粒状 氯化镁生产装置 .....	642	10.7.1 概述 .....	660
10.5.3 浓海水提取硫酸镁 .....	643	10.7.2 基于盐田法的传统综合利用方案 ..	661
10.5.3.1 硫酸镁性状、用途 .....	643	10.7.3 基于电渗析法制盐的综合利用方案 .....	662
10.5.3.2 硫酸镁的生产方法 .....	644	10.7.4 基于直接提取化学资源的综合 利用方案 .....	662
10.5.4 浓海水提取氢氧化镁 .....	644	10.7.5 反渗透-电渗析集成膜过程的 综合利用 .....	663
10.5.4.1 氢氧化镁性质、用途 .....	644	10.7.6 大力发展海水综合利用技术的 建议 .....	663
10.5.4.2 氢氧化镁技术标准 .....	645	<b>参考文献 .....</b>	<b>664</b>
10.5.4.3 氢氧化镁生产方法 .....	645		
10.5.5 浓海水提取镁砂 .....	647		
10.5.5.1 镁砂的性状、用途 .....	647		

## 第 11 章 海水淡化对环境的影响及评价与对策

<b>11.1 海水淡化对海洋环境的影响 .....</b>	<b>669</b>	11.1.3 海水淡化的预处理和化学清洗用 药剂对海洋生态环境的影响 .....	673
11.1.1 海水淡化的能耗 .....	669	11.1.4 腐蚀产物和固废对海洋环境的影响 .....	674
11.1.2 浓海水排放对海洋环境的影响 .....	669	11.1.5 取、排水机械作用对海洋生物的影响 ..	674
11.1.2.1 浓盐水对海洋环境影响的差异 .....	670	11.1.6 占地和噪声 .....	674
11.1.2.2 对海水水质的影响 .....	671	<b>11.2 海水利用对海洋环境影响的评价 .....</b>	<b>675</b>
11.1.2.3 对河口生物的影响 .....	671		

11.2.1 国内外有关海洋环境方面的法规 …	675	11.4.1.2 以冷却水或污水稀释 ……………	684
11.2.2 对海洋环境影响评价 ——生物生活环境评估 ……………	675	11.4.1.3 喷射分散 ……………	684
11.2.3 对海洋环境影响评价的标准 ……………	677	11.4.1.4 海流携带 ……………	684
11.2.4 对海洋环境影响评价的方法 ……………	678	11.4.2 脱盐技术的改进 ……………	685
11.2.5 对海洋环境影响评价的程序 ……………	679	11.4.3 可再生能源的利用(详见本书 第6章) ……………	686
11.3 海水利用对环境的影响实例 ……………	681	11.4.4 浓海水资源的充分利用(详见本书 第10章) ……………	688
11.4 预防和缓减对海洋环境影响的 对策 ……………	683	11.4.5 海水利用给水预处理水中的化学物 ……	690
11.4.1 浓、温海水排放的方式 ……………	683	11.4.6 其他相应措施 ……………	690
11.4.1.1 建立数字水流、水质和 水温模型 ……………	683	参考文献 ……………	690

索引 .....	693
----------	-----