

# 海水淡化

王俊鹤 李鸿瑞 编  
周迪颐 彭启强

科学出版社

1822

水电部科技情报所	
图书总号	<del>中 4777</del>
分类号	4

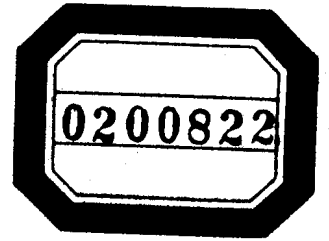
请爱护图书



006383 水利部信息所

# 海 水 淡 化

王俊鹤 李鸿瑞 编  
周迪颐 彭启强



科学出版社

1978

## 内 容 简 介

本书是一部关于海水淡化及咸水脱盐的基础理论著述，综合系统地介绍了海水淡化各种方法的基本原理、典型工艺过程和设备，以及与之有关的若干理论问题。全书共分十章：(一)绪论；(二)流体力学基础；(三)海水预处理；(四)蒸馏法；(五)冷冻法；(六)电渗析法；(七)反渗透法；(八)反渗透膜；(九)其他淡化方法；(十)淡化方法比较及副产品利用。

本书可供从事海水淡化、咸水脱盐及有关废水处理人员以及应用淡化技术从事化学化工分离、提纯、浓缩等工作的人员参考；同时也可作为有关院校师生的基础理论读物。

21050/2

## 海 水 淡 化

王俊鹤 李鸿瑞 编  
周迪颐 彭启强

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1978年4月第一版 开本：787×1092 1/16  
1978年4月第一次印刷 印张：15 1/2  
印数：0001—4,290 字数：348,000

统一书号：13031·724

本社书号：1046·13—17

定价：1.90元

## 序

“海水淡化”是五十年代开始迅速兴起的一门应用科学,是海洋开发的重要组成部分,是关系到人类生存和社会发展的世界性重大应用技术课题。目前在国际上,某些淡化方法已进入大规模应用阶段。我国的海水及咸水淡化工作,近年来发展很快,取得了可喜成果,且淡化方法作为一种分离和提纯手段,也在全国许多地区、单位和部门得到了推广和应用。可以预见,海水淡化在我国社会主义革命和建设中的地位将日趋重要,淡化技术的应用范围也将日益广泛。但目前国内尚缺乏这一方面的基础理论读物,为适应形势发展的需要,特将我们在科研和教学中搜集的国内外有关资料、书刊论著以及讲义等素材,汇编成册,以供有关科研、生产以及教学人员参考。

本书初稿完成于1975年初,同年底电渗析技术交流会和反渗透技术交流会之后,又作了部分补充;于1976年定稿进行审订。在近两年内,国内外海水淡化技术又有了许多新的进展,在此期间,又收到了关于本书的若干宝贵意见,这些意见和资料,待再版时加以修改和补充。

在本书编写过程中,曾得到许多方面的支持和帮助,在此仅向国家海洋局第二海洋研究所、中国科学院大连化学物理研究所、中国科学院海洋研究所、中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所、北京市环境保护科学研究所、上海科学技术情报研究所、清华大学建工系、同济大学水暖工程系、兰州铁道学院给排水系等单位以及天津大学王世昌同志、大连工学院林正芳教授、张洪同志致以谢意。

海水淡化是一项综合性应用技术科学,涉及到许多学科和部门,每一方法都足以写一本专著,本书仅从基础理论方面对各种淡化方法作一扼要介绍。由于编者水平所限,书中难免有许多错误和不当之处,敬希读者批评指正。

编者

一九七八年一月

# 目 录

序

<b>第一章 绪论</b> .....	1
<b>第一节 海水淡化的意义</b> .....	1
一、地球上的水源与水质 .....	1
二、海水淡化的意义 .....	3
<b>第二节 海水的组成及性质</b> .....	4
一、海水的组成及特性 .....	4
二、海水的氯度与盐度 .....	5
三、海水的性质 .....	6
<b>第三节 海水淡化方法简介及海水淡化发展状况</b> .....	8
一、淡化方法简介 .....	8
二、海水淡化的理论耗能量 .....	14
三、海水淡化发展状况 .....	16
<b>第二章 流体力学基础</b> .....	19
<b>第一节 流体力学基本方程</b> .....	19
一、流体静力学方程 .....	19
二、流体连续性方程 .....	20
三、流体动力学方程 .....	21
<b>第二节 管路阻力计算</b> .....	22
一、流体的流动形态与雷诺数 .....	22
二、板式淡化装置中的雷诺数讨论 .....	24
三、管路阻力计算 .....	25
<b>第三节 流量与流速的测量</b> .....	27
一、水表 .....	27
二、转子流量计 .....	27
三、锐孔流速计与文丘里流速计 .....	28
四、堰和细缝流量计 .....	29
<b>第四节 流体输送机械</b> .....	30
一、流体输送过程的能量供需特性 .....	31
二、往复泵 .....	32
三、离心泵 .....	33
四、往复压缩机与往复真空泵 .....	37
五、蒸汽喷射泵 .....	38
六、罗茨鼓风机 .....	39
<b>第五节 流体输送计算</b> .....	39
一、根据输送任务和管路系统计算输送设备 .....	39
二、根据输送任务与输送设备计算管径 .....	41

• i •

<b>第三章 海水预处理</b> .....	44
一、概述 .....	44
二、灭菌 .....	44
三、沉降 .....	45
四、过滤 .....	49
五、软化 .....	52
六、脱气 .....	54
<b>第四章 蒸馏法</b> .....	56
<b>第一节 概述</b> .....	56
一、蒸馏过程的实质 .....	56
二、蒸馏法种类 .....	56
三、蒸馏过程的最小功 .....	56
四、蒸馏法的特点及问题 .....	57
<b>第二节 蒸馏法的传热理论基础</b> .....	58
一、蒸馏过程与传热操作 .....	58
二、加热蒸汽对管壁冷凝给热 .....	59
三、通过管壁的热传导 .....	59
四、管壁对沸腾海水给热 .....	60
五、热交换 .....	62
六、传热温度差 $\Delta t'$ .....	62
七、列管式换热器 .....	63
<b>第三节 锅垢的形成和防止</b> .....	64
一、锅垢的定义及组成 .....	64
二、锅垢的形成和危害 .....	64
三、防垢方法 .....	65
<b>第四节 竖管蒸馏</b> .....	66
一、竖管蒸馏原理 .....	66
二、效间温度差分配与影响效数的因素 .....	67
三、竖管蒸馏的工艺及设备 .....	69
四、竖管蒸馏法优缺点 .....	71
<b>第五节 蒸汽压缩蒸馏</b> .....	71
一、蒸汽压缩蒸馏原理 .....	71
二、蒸汽压缩蒸馏流程 .....	73
三、蒸汽压缩蒸馏的线图讨论 .....	73
四、蒸汽压缩蒸馏的热功效率 .....	75
五、离心压缩蒸馏 .....	75
六、蒸汽压缩蒸馏法优缺点 .....	76
<b>第六节 多级闪急蒸馏</b> .....	76
一、多级闪急蒸馏原理 .....	76
二、多级闪蒸流程 .....	77
三、多级闪蒸工艺条件 .....	79
四、多级闪蒸设备及材料 .....	81

五、多级闪蒸法优缺点及发展状况 .....	84
六、直接接触闪急蒸馏 .....	85
七、真空闪急蒸馏 .....	85
第七节 组合方法及其他蒸馏方法 .....	86
一、闪急压缩蒸馏 .....	86
二、多效闪急蒸馏 .....	88
三、其他蒸馏方法 .....	88
<b>第五章 冷冻法</b> .....	91
第一节 概述 .....	91
一、冷冻法原理与分类 .....	91
二、冷冻法之海水浓缩率 .....	92
三、冷冻法之优缺点 .....	92
第二节 冷冻法淡化流程 .....	93
一、间接冷冻法 .....	93
二、蒸汽压缩式真空冷冻法 .....	93
三、蒸汽吸收式真空冷冻法 .....	94
四、丁烷冷冻法 .....	95
第三节 冰晶的生成与洗涤 .....	96
一、冰晶的生成 .....	96
二、冰晶的洗涤 .....	97
<b>第六章 电渗析法</b> .....	98
第一节 电渗析法海水淡化原理及过程 .....	98
一、电渗析法海水淡化原理 .....	98
二、电渗析法海水淡化过程 .....	99
第二节 电渗析淡化器的组成和淡化工艺流程 .....	102
一、电渗析淡化器的组成 .....	102
二、电渗析法海水淡化工艺流程 .....	107
三、高温电渗析 .....	109
四、水的流失 .....	110
五、水的收率 .....	111
第三节 离子交换膜 .....	111
一、离子交换膜的作用机理 .....	111
二、离子交换膜的分类 .....	114
三、离子交换膜的制备 .....	115
四、离子交换膜的物理化学性能及其测定方法 .....	116
第四节 电耗、极化和沉淀 .....	125
一、电能消耗 .....	125
二、电流密度 .....	127
三、极化和沉淀 .....	132
第五节 咸水淡化及水处理 .....	133
一、咸水淡化 .....	133
二、纯水及高纯水的制备 .....	134

三、有害废水处理 .....	136
第六节 电渗析法的其他应用 .....	138
一、浓缩、分离与提纯 .....	138
二、电解工业中的应用 .....	139
<b>第七章 反渗透法</b> .....	141
第一节 反渗透法淡化原理 .....	141
一、渗透和渗透压 .....	141
二、反渗透法基本原理 .....	143
三、反渗透淡化用半透膜 .....	143
四、反渗透淡化的特点 .....	143
第二节 反渗透淡化装置 .....	145
一、板框式反渗透淡化装置 .....	145
二、管式反渗透淡化装置 .....	146
三、螺旋卷式反渗透淡化装置 .....	148
四、中空纤维式反渗透淡化装置 .....	149
五、反渗透淡化装置比较 .....	150
第三节 反渗透淡化流程及工艺参数的选择 .....	151
一、反渗透法一级与二级淡化流程 .....	151
二、反渗透法工艺参数选择 .....	152
第四节 反渗透法的变体 .....	153
一、压渗析法 .....	153
二、热渗透法 .....	154
第五节 反渗透法的其它应用 .....	154
一、纯水制备及废水、废液处理 .....	155
二、回收电镀废液中的重金属 .....	158
三、海洋中油水的分离 .....	159
四、血液中有毒物质的脱除 .....	159
<b>第八章 反渗透膜</b> .....	161
第一节 反渗透膜的性能要求与分类 .....	161
一、反渗透膜的性能要求与测试方法 .....	161
二、反渗透膜的分类 .....	162
第二节 醋酸纤维素膜 .....	162
一、醋酸纤维素的结构和性质 .....	162
二、醋酸纤维素膜的制备 .....	165
三、制膜条件对膜性能的影响 .....	168
四、醋酸纤维素膜的结构和形成机理 .....	170
五、醋酸纤维素膜的特性 .....	172
第三节 芳香族聚酰胺膜 .....	176
一、聚酰胺膜类型 .....	176
二、芳香族聚酰胺膜的制备 .....	178
三、芳香族聚酰胺膜的结构和特性 .....	179
四、典型芳香族聚酰胺膜简介 .....	180



<b>第四节</b>	<b>研究和发展的反渗透膜</b> .....	182
一、	醋酸纤维素膜的改性 .....	182
二、	聚哌嗪酰胺膜 .....	185
三、	聚苯并咪唑膜 (简称 PBI 膜) .....	186
四、	磺化聚砜膜 .....	187
五、	磺化聚 2,6-二甲基-1,4-苯撑氧膜 (简称 PPO 膜) .....	187
六、	动力形成膜 .....	188
七、	玻璃纤维膜 .....	189
<b>第五节</b>	<b>反渗透膜的透过机制</b> .....	189
一、	氢键机制 .....	189
二、	溶解扩散机制 .....	190
三、	选择性吸附-毛细管流机制 .....	191
<b>第六节</b>	<b>浓差极化及膜的结垢附着与再生</b> .....	192
一、	浓差极化 .....	192
二、	膜的结垢附着与再生 .....	194
<b>第七节</b>	<b>结束语</b> .....	195
<b>第九章</b>	<b>其他淡化方法</b> .....	197
<b>第一节</b>	<b>溶剂萃取法</b> .....	197
一、	溶剂萃取法的基本原理 .....	197
二、	萃取剂的选择 .....	197
三、	混合萃取剂 .....	198
四、	原水含盐量对萃取性能的影响 .....	199
五、	萃取剂的回收 .....	199
六、	盐析剂 .....	200
七、	溶剂萃取法海水淡化过程 .....	200
八、	溶剂萃取法的优缺点 .....	202
<b>第二节</b>	<b>水合物法</b> .....	202
一、	水合物法的基本原理 .....	202
二、	水合物的结构 .....	203
三、	水合剂的选择 .....	204
四、	水合物生成条件 .....	205
五、	水合物的性质 .....	206
六、	水合物法海水淡化 .....	208
七、	水合物法优缺点 .....	209
<b>第三节</b>	<b>离子交换法</b> .....	210
一、	离子交换树脂 .....	210
二、	离子交换法的基本原理 .....	212
三、	离子交换树脂的再生 .....	214
四、	离子交换法的系统流程 .....	215
五、	离子交换法海水淡化 .....	216
六、	应急救生离子交换药剂 .....	218

<b>第十章 海水淡化方法比较及副产物利用</b> .....	220
<b>第一节 海水淡化方法比较</b> .....	220
一、能量特征 .....	220
二、原水浓度 .....	223
三、淡化水质 .....	225
四、装置规模 .....	225
<b>第二节 海水淡化方法组合</b> .....	226
一、方法本身的组合与方法之间的组合 .....	226
二、发电—淡化组合 .....	228
<b>第三节 海水淡化与综合利用</b> .....	229
一、海水综合利用概述 .....	229
二、淡化—综合利用 .....	232
三、发电—淡化—综合利用 .....	233

# 第一章 绪 论

“海水淡化”，亦称“海水脱盐”，其含义是：将海水脱去盐份，变为供人类生活及工农业生产用的淡水。现在通称的海水淡化，还包括咸水淡化。海水与咸水，二者含盐量虽不相同，但淡化原理及工艺设备基本相同，淡化目的也完全一致，故本书虽名“海水淡化”，实为“海水及咸水淡化”。

## 第一节 海水淡化的意义

### 一、地球上的水源与水质

#### 1. 水源分布及水质情况

地球的总面积约为五亿一千万平方公里，其中海洋面积占 70.8%。海洋的平均深度约为 3,800 米，所以海水的总体积约为十三亿立方公里，海水占地球总水量的 97% 以上。其余约 3% 的水量，分布在空气、江河、湖泊、冰川及地下。水源分布及水质情况如表 1-1 所示。一般应用对水质的要求如表 1-2 所示。

表 1-1 地球上的水源分布及水质情况

水 源 分 布		水 量		水质(含盐量 ppm*)
		体 积 (10 <sup>9</sup> 米 <sup>3</sup> )	%	
空 气 中 水 汽		12,900	0.001	
地 表 水	江 河、 湖 泊	230,000	0.017	100—500**
	冰 川	29,120,000	2.157	
	海 洋	1,318,720,000	97.2	28,000—35,000
地 下 水		8,616,600	0.625	300—10,000
合 计		1,356,699,500	100.00	

\* 1ppm = 1/100 万 = 1 毫克/升。

\*\* 部分雨水稀少地区，地表水含盐量可达 1000—5000 ppm。某些内陆湖水含盐量可高达 40,000 ppm 以上。

表 1-2 各种应用对水质要求

应 用 范 围	水 质 要 求 (ppm)
饮 用	< 500
工 业	1—3,000*
农 业	< 3,000

\* 医药、电子等工业及某些科学试验用水，对水质要求特高。

#### 2. 淡水的供需矛盾

由上两表可见，海水虽多，却因含盐量高而不能直接应用。地球上可供应用的淡水，

仅占总水量的 0.64% 左右。

淡水来源主要靠降水。部分国家的降水量如表 1-3 所示。若按用水量较高国家的标准计算,平均每人每年需水 1,500—1,800 米<sup>3</sup> (包括工农业用水), 则降水量相当于需水量的数倍至数十倍之多。因此,淡水占总水量的比数虽少,其绝对数量应是足够使用的。但由于下述原因,仍存在淡水的供需矛盾:

①降水地区分布不均匀,陆地地上有大量荒漠和半荒漠地区(表 1-4), 这些地区雨量稀少,严重缺水,不少水源含盐量较高,不能直接饮用,也不能供工农业利用;

②降水时间分配不均匀,雨季降水集中,难于大量储存;

③城市人口与工业集中,用水量高度集中;

④某些特殊场合,如船舶、海岛等,无法享用雨水;

⑤由于资本主义社会生产的无政府状态,任意排放污水,造成严重的环境污染。据估计,目前全世界每年约有 4200 亿吨污水排入河流,造成大量水体的污染,这也是造成水源不足的重要原因之一。

表 1-3 部分国家单位人口降水量

国 名	面 积 (平方公里)	人 口 (1967 年) (千人)	降 水 量 (亿米 <sup>3</sup> /年)	单位人口降水量 (米 <sup>3</sup> /年/人)
世 界	149,405,000	3,420,000	1,084,000	32,000
美 国	9,363,353	199,118	78,000	39,000
英 国	244,030	55,068	1,960	3,560
法 国	547,026	49,890	4,150	8,320
加 拿 大	9,976,139	20,441	78,800	385,000
挪 威	342,219	3,784	4,700	124,000
苏 联	22,402,200	235,543	87,300	37,100
日 本	369,776	99,920	6,700	6,610
中 国 (未包括台湾省)	9,561,000	720,000	80,000	11,100

(本表摘自 Ocean Age Vol. 3 1971 年 No. 9 p.71, 原表人口取自世界人口年鉴。)

表 1-4 各大陆土地面积和荒漠面积

大 陆	土 地 面 积		荒 漠 面 积	
	平 方 公 里	%	平 方 公 里	占土地面积%
亚 洲 (包括苏联亚洲部分)	49,264,390	36.46	4,232,060	8.57
欧 洲	4,905,460	3.63		
美 洲	42,092,680	31.16	1,745,660	4.14
非 洲	30,328,900	22.45	6,967,100	23.00
大 洋 洲	8,513,330	6.30	2,849,000	33.40
总 计	135,104,760	100.00	15,793,820	

今后随着人口不断增长和工农业生产日益发展,淡水需要量还将日渐增加。

为了解决淡水资源不足问题,一般采取如下措施:

- ①充分利用现有的地表水及地下水;
- ②重复使用未污染的工业用水;
- ③就近引水或跨流域引水;
- ④在河口、海湾蓄积淡水或修建水库蓄水。近年来,还提出采用“地下水库”<sup>1)</sup>蓄水;
- ⑤为了减少用水量,也有研究防止水面蒸发和直接利用咸水(包括海水)进行农业灌溉等;
- ⑥海水或咸水淡化。

## 二、海水淡化的意义

水与空气一样,是生命之源,是人类生存和社会发展的物质基础。在上述各种解决水源不足的措施中,前几种方案是“节流”,海水淡化则是“开源”。节流毕竟潜力有限,而海洋是一个巨大的水库,海水取之不尽,用之不竭,所以海水淡化才是解决水源不足的根本途径,因而淡化水的价值,也就不能单纯以它的价格来衡量。海水淡化不仅是某一国家、某一地区、某一时间的局部问题,而是世界范围内涉及到人类生存和社会发展的长远而重大的问题。海水淡化的意义,具体说来,有以下几点:

①可以根据所需地点,所需时间、所需水量及水质进行生产,为淡水需要量的不断增长提供了保证;

②提供某些特殊用水,如船舶与海岛用水,以及特定技术要求用水等;

③为开垦荒漠,发展缺水地区的工农业生产提供了条件;

④利用淡化方法除去水中某些危害人体健康的成份(如氟等),提供卫生饮水;

⑤淡化技术的发展,也丰富和发展了其他生产过程中的分离技术,如海水浓缩制盐,海水综合利用,工业废水及有害废水处理,酸、碱液的回收,以及医药、食品的精制、纯化等等,淡化技术在这些生产部门中,正获得日益广泛的应用;

⑥淡水生产还可以和工业废热利用,剩余电力利用相结合,使能量达到合理有效的利用。

海水淡化本来是科学发展为人类提供的物质财富,可是帝国主义和社会帝国主义为了侵略和扩张的需要,把海水淡化也作为一种侵略手段,如在中东等某些缺水的沿海地区,以援助为名,建立许多大型海水淡化工厂,从而控制该地区的政治和经济命脉,掠夺资源,奴役人民。

我国是社会主义国家,遵照毛主席关于“**备战、备荒、为人民**”的指示,大力发展海水淡化事业,不仅具有重要的经济意义,更具有重大的政治意义:

①可以减少舰艇的淡水装载量,提高续航力和战斗力;

②为守卫边防和海岛的指战员提供卫生饮用水,保证身体健康,有利于巩固国防;

③改善内陆咸水地区人民的饮水条件,体现党对人民的关怀;

1) 所谓地下水库,就是利用地下的天然不透水层包围的滞水层或滞水层的一部分,用人造的止水壁隔开,再把大量的水储存在滞水层的砂砾层中,需要时扬水利用。这一方案在某些国家颇受重视。

- ④利用淡化方法处理污水,减轻或避免水源的污染,体现社会主义制度的优越性;
- ⑤反对两霸,支援第三世界。

## 第二节 海水的组成及性质

### 一、海水的组成及特性

#### 1. 海水的组成

海水是一种具有复杂组成的液体。已知海水中含有 80 多种化学元素,主要以离子形式存在。在海水浓缩、结晶过程中,则以盐的形式析出。其中有 11 种成份的含量超过 1ppm(表 1-5),称为海水的“主要组份”,它们占海水总含盐量的 99.58%。

表 1-5 海水中的主要化学组份

元 素	Cl	Na	Mg	S	Ca	K	Br	Sr	B	Si	F
存在形式	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	Sr <sup>++</sup>	B(OH) <sub>3</sub>	Si(OH) <sub>4</sub>	F <sup>-</sup>
含 量 (ppm)	19,000	10,500	1,350	885	400	380	65	8.0	4.6	3.0	1.3

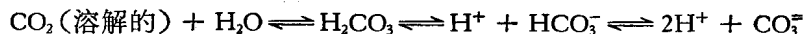
此外,海水中还存在某些同位素,重要的有氢的同位素(氘)等。

海水中也溶解有多种气体(表 1-6),含量最多的为二氧化碳、氮和氧。空气中的稀有气体氦、氖和氩,在海水中也有微量存在。在含氧量少的海水中,还含有硫化氢。在流动性小并有腐烂生物驱体的情况下,还含有甲烷等气体。

表 1-6 海水中溶解的气体

气 体	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar
含 量 (ppm)	102.5	12.82	8.05	0.479

溶解在海水中的二氧化碳,与淡水中的情况不同。淡水中的二氧化碳,主要以游离状态存在,可用煮沸或减压的方法驱除。溶解在海水中的二氧化碳,除少量是游离形式外,主要是以碳酸根及碳酸氢根的离子形式存在,需加入强酸方可逐出。海水中的二氧化碳,在一定条件下,彼此保持下列平衡关系:



海水中的二氧化碳,与海水的 pH 值有密切关系。海水的 pH 值范围约在 7.5 至 8.4 之间,当海水中的二氧化碳与大气中的二氧化碳取得平衡时, pH 值一般在 8.1 到 8.3 之间。海面或海面附近的海水, pH 值一般较高。而在二氧化碳含量较高的海水中, pH 值则接近于 7.5 的最低值。

海水中除存在上述的复杂组成和关系外,还含有不同数量的无机和有机的悬浮物,所以海水是一个具有复杂组成的液体体系。

海水中的悬浮物、溶解气体及 pH 值等,是海水淡化过程中与操作直接有关的影响因

素,对海水预处理的方法及生产过程中的结垢、腐蚀等关系都很大。

## 2. 相对组成恒定性

海水中的主要成份,其绝对含量虽因地区不同而有所差别,但所有不受迳流影响的大洋海水,化学组成均极相似,其相互比值恒定不变,此即称为“相对组成恒定性”。这是由于海水的环流及混合作用造成的结果。根据这一特性,只要测定其中一种组份的含量,就能够按比例计算出其他组份的含量或算出总含盐量,并可由此估计海水的许多理化性质。这是海水性质的一个重要规律。

## 二、海水的氯度与盐度

### 1. 海水的氯度

氯度的原始定义是:在 1,000 克海水中,若将溴和碘以氯代替,氯、溴、碘的总克数,即为氯度  $Cl$ ,以千分符( $\text{‰}$ )表示。写成公式形式为:

$$Cl\text{‰} = (Cl^-) + \left[ \frac{(Br^-)}{Br} + \frac{(I^-)}{I} \right] \times Cl \quad (1-1)$$

式中  $(Cl^-)$ 、 $(Br^-)$ 、 $(I^-)$ ——1,000 克海水中离子的含量;

$Cl$ 、 $Br$ 、 $I$ ——元素的原子量。

所以,氯度并不只是指海水中氯离子浓度,而同时包括溴、碘离子以氯当量代替的量。

但上述定义的缺点是氯度与原子量有关。为使氯度不致因原子量数值的改变而产生表观变化,氯度的现定义为:沉淀 0.3285233 公斤海水中全部卤素所需纯银的克数,即为氯度<sup>1)</sup>。

氯度的测定是作为海水成份和性质的计算基础,是海洋学的重要参数。在海水淡化中,也是通过氯度的测定来确定海水及浓、淡水的含盐量。

在分析中为了方便,多采用体积氯度。“体积氯度”是指 20℃ 时,1 升海水中所含的相当于氯度值的物质。其值等于海水的氯度乘以它在 20℃ 时的密度。

### 2. 海水的盐度

盐度的定义是:在 1,000 克海水中,将所有的碳酸盐转变为氧化物,将所有溴化物和碘化物转变为氯化物,将所有的有机物完全氧化后,其所含固体物质的总克数,即为盐度  $S$ ,以千分符( $\text{‰}$ )表示。

盐度与氯度之间的关系为:

$$S\text{‰} = 0.030 + 1.8050 \times Cl\text{‰} \quad (1-2)$$

盐度与总盐量不是一回事。总盐量是海水中各个溶解盐类浓度的总和,以符号  $\Sigma \text{‰}$  表示,它与氯度之间的关系为:

$$\Sigma\text{‰} = 0.073 + 1.8110 \times Cl\text{‰} \quad (1-3)$$

1)根据精确的分析,沉淀 1 公斤氯度值为 19.3810‰ 的标准海水中的全部卤素,需纯银 58.9943 克。如果取纯银量与氯度值相同的 19.3810 克时,则能沉淀的标准海水量为:

$$19.3810 \times 1 / 58.9943 = 0.3285233 \text{ 公斤}$$

如氯度为 19.00‰ 的海水, 则盐度为 34.325‰, 总盐量为 34.482‰。

### 三、海水的性质

#### 1. 密度与比重

海水的密度 ( $\rho$ ) 是指单位体积海水的质量, 单位为 克/厘米<sup>3</sup>。海水的比重是指任一温度的海水密度与 4℃ 纯水的密度之比。纯水在 4℃ 时的密度为 1 克/厘米<sup>3</sup>, 所以海水的密度与比重的绝对数值相等。

海水的密度一般在 1.01000—1.03000 克/厘米<sup>3</sup> 之间, 其值随温度和盐度的变化而有显著的变化 (表 1-7)。压力对密度的影响较小, 一般不加考虑。

表 1-7 海水密度表 (克/厘米<sup>3</sup>)

密度 温度(°C)	纯 水	海 水 含 盐 量 (‰)				
		10	20	30	35	40
-2	0.99969	1.00792	1.01605	1.02415	1.02821	1.03233
0	0.99987	1.00801	1.01607	1.02410	1.02813	1.03222
5	0.99999	1.00796	1.01586	1.02374	1.02770	1.03172
10	0.99973	1.00756	1.01533	1.02308	1.02698	1.03093
15	0.99915	1.00684	1.01450	1.02215	1.02599	1.02990
20	0.99823	1.00585	1.01342	1.02098	1.02478	1.02865
25	0.99708	1.00461	1.01211	1.01959	1.02336	1.02720
30	0.99568	1.00314	1.01057	1.01800	1.02175	1.02555
35	0.99474	1.00216	1.00955	1.01696	1.02069	1.02448

在海洋学上, 为应用简便起见, 也采用另一种海水密度 ( $\sigma$ ) 的表示法, 其规定为:

$$\sigma = (\rho - 1) \times 1000 \quad (1-4)$$

如  $\rho = 1.02575$ , 则  $\sigma = 25.75$ 。

#### 2. 比热

使 1 克海水温度升高 1℃ 所需的热量, 称为海水的比热, 单位为 卡/克·度。海水的比热随盐度的增加而降低, 表 1-8 为 17.5℃ 时海水的比热与盐度的关系。

表 1-8 17.5℃ 时海水的比热

盐度 (‰)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
比热 (卡/克·度)	1.000	0.982	0.968	0.958	0.951	0.945	0.939	0.932	0.926

表 1-9 海水的比热与温度的关系 ( $S = 34.85\%$ )

温度 (°C)	-2	0	5	10	15	20
比 热 (卡/克·度)	0.942	0.941	0.938	0.935	0.933	0.932

在 0℃ 和 1 个大气压力下, 海水的比热 ( $C_p$ ) 与盐度的关系可由下述经验公式计算:



$$C_p = 1.005 - 0.004136 S\% + 0.0001098 S\%^2 - 0.000001324 S\%^3 \quad (1-5)$$

温度与压力对海水比热的影响和对纯水的影响相似。海水的比热随温度的升高而下降,如表 1-9 所示。

### 3. 蒸发热

海水的蒸发热为海水变为同温度的蒸汽所需的热量,单位为卡/克或千卡/千克。海水的蒸发热略高于纯水。例如,纯水在 0°C 时的蒸发热为 595.9 卡/克,海水则为 596.1 卡/克。表 1-10 为海水的蒸发热与温度的关系。

表 1-10 海水蒸发热与温度的关系 (S = 34.85‰)

温度(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
蒸发热 (卡/克)	596.1	590.9	585.6	580.2	574.8	569.2	563.5	557.7	551.8	545.7	539.5

### 4. 冰点及沸点

海水的冰点约为 -1.9°C, 冰点降低值 ( $\Delta t_f$ ) 与氯度的经验关系为:

$$\Delta t_f = -0.0966 C1\% - 0.0000052 C1\%^3 \quad (1-6)$$

海水的沸点约为 100.5°C, 沸点升高值 ( $\Delta t_b$ ) 与盐度有如下经验关系:

$$\Delta t_b = 0.016455 S\% \quad (1-7)$$

表 1-11 为不同盐度海水的冰点、沸点值。

表 1-11 海水的冰点、沸点与盐度的关系

盐度 (‰)	0	5	10	20	30	35
冰点(°C)	0	-0.24	-0.53	-1.07	-1.63	-1.91
沸点(°C)	100.00	100.08	100.16	100.37	100.47	100.56

### 5. 蒸汽压

海水的蒸汽压略低于纯水的蒸汽压。在同一温度下, 不同氯度的海水蒸汽压 (P) 与纯水的蒸汽压 ( $P_0$ ) 关系为:

$$P/P_0 = 1 - 0.000969 C1\% \quad (1-8)$$

### 6. 渗透压

海水的渗透压 ( $\pi$ ) 与其冰点降低值 ( $\Delta t_f$ ) 之间具有如下关系:

$$\pi_0 = -12.08 \Delta t_f \quad (1-9)$$

式中  $\pi_0$ ——海水在 0°C 时的渗透压。

任一温度下海水的渗透压 ( $\pi_t$ ), 可由下式计算:

$$\pi_t = \pi_0 \times \frac{273 + t}{273} \quad (1-10)$$