

水处理及 循环利用技术

● ●
龙 邵
荷 青
云 主
安 编
鼎 年
编



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

水处理及循环再利用技术

邵 青 主编

龙荷云 安鼎年 编

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水处理及循环再利用技术/邵青主编; 龙荷云, 安鼎年编. —北京: 化学工业出版社, 2003. 10
ISBN 7-5025-4843-2

I. 水… II. ①邵…②龙…③安… III. ①水处理-技术②废水综合利用 IV. ①TU991.2②X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 089829 号

水处理及循环再利用技术

邵 青 主 编

龙荷云 安鼎年 编

责任编辑: 夏叶清 王 斌

责任校对: 李 林

封面设计: 蒋艳君

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 348 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4843-2/X·338

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

随着人类对自身与环境的关系认识的不断提高,水资源可持续发展的理念与水处理及回用技术的研究、开发、应用得到了极大的重视,新理论、新技术不断地得以发展和应用。作者以水循环和再利用(给水处理、用水、处理净化、水循环回用)的思路,介绍了水处理及循环再利用的原理、技术,国内外水处理净化、回用的新技术和工程化应用及实例。本书详细介绍了给水处理技术和深度水处理技术(如膜技术)及应用;最常用的混凝技术的理论和实验方法;工业循环冷却水系统的设计、运行;工业循环水系统水质处理中阻垢、缓蚀、菌藻和微生物控制的原理和技术;城市污水处理厂出水的深度处理技术、回用系统以及某些工业废水的深度处理和回用技术及应用实例。并结合多年的学习和实践,介绍了如何研究制定某些工业废水处理工艺方案的思路和一些实验方法。本书可作为环境工程专业、化学工艺和工程等专业大学生的教学参考书,也可作为水处理工程技术人员的参考书。

本书第四章的主要内容在南京工业大学龙荷云教授编写;第二章的第一节~第三节纤维束过滤技术和第五章的部分内容由天津大学安鼎年教授、张俊贞教授编写;全书的构思和统稿及其余部分的编写由邵青完成。在本书的编写过程中,得到了天津化工研究设计院、国家工业水处理工程技术研究中心、中国化工学会工业水处理专业委员会、《工业水处理》杂志社、天津膜天膜工程技术有限公司等许多专家和同仁的热情关心和帮助,在此深表谢意,并对本书中所引用的参考文献的作者深表感谢。

编者

2003. 7. 28

内 容 提 要

本书以水循环和再利用(给水处理、用水、处理净化、水循环回用)为主题,详细介绍了水处理及循环再利用的原理、技术,国内外水处理净化、回用的新技术和工程化应用及实例。本书主要内容包括以下几个方面:工业循环冷却水系统的设计、运行;循环冷却水系统补充水的处理工艺;循环水系统水质处理中阻垢、缓蚀、菌藻和微生物控制的原理、方法和技术;城市污水处理厂出水的深度处理技术、回用系统。并给出了某些工业废水的深度处理和回用技术及应用实例。另外,作者还结合多年的学习和实践,介绍了如何研究制定某些工业废水处理工艺方案的思路和一些实验方法。

本书内容实用、新颖,可作为高等院校环境工程专业、化学工艺和工程等专业师生的教学参考书,也可供各个使用循环冷却水的工业部门中从事水处理工程技术人员和管理人员参考。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 水在自然界中的循环和水资源的分布	3
一、水在自然界中的循环	3
二、水资源的分布	3
三、我国天然水的分布	4
第二节 水的特点	6
一、天然水的成分	6
二、天然水源的水质概况	9
三、天然水的化学特征和分类	14
四、废水的特点	22
第二章 冷却水系统	26
第一节 冷却水系统类型	26
一、直流冷却水系统	26
二、循环冷却水系统	27
第二节 敞开式循环冷却系统主要设备	29
一、冷却构筑物的类型	29
二、冷却系统的构造	33
第三节 冷却塔工艺设计计算	48
一、水冷却的基础知识	48
二、冷却塔的热力学计算方法	58
第四节 敞开式循环冷却水系统的运行	71
一、敞开式循环冷却水系统流程	72
二、循环冷却水系统的平衡	72
三、循环系统运行中离子浓度的变化	75
四、冷却塔风吹飘滴对环境的影响	78
五、循环冷却水系统运行的监控	79
第五节 循环冷却水处理	79

一、循环冷却水处理的必要性	79
二、循环冷却水的水质要求	81
第三章 循环冷却水的补充水处理	91
第一节 反应器数学模型	91
一、全混流反应器模型	93
二、平推流式反应器模型 (PFR)	99
三、理想反应器的组合	102
四、非理想状态反应器	105
第二节 混凝技术	109
一、有关凝聚与絮凝的理论	111
二、混凝作用和设施	121
第三节 分离作用和设施	181
一、沉淀分离	181
二、澄清分离	184
三、过滤	189
第四节 膜分离技术	199
一、微滤和超滤	199
二、反渗透	206
三、补充水处理工艺流程	211
第四章 循环冷却水的水质处理及控制	213
第一节 冷却水系统中沉积物的形成和控制	213
一、水垢	213
二、污垢的形成	216
三、系统中水垢析出的判断	217
四、冷却水系统中沉积物的控制	238
第二节 冷却水系统金属的腐蚀和控制	253
一、冷却水系统金属腐蚀的原因	254
二、冷却水中金属腐蚀形态	264
三、冷却水系统中金属材料的防腐蚀和控制	267
第三节 冷却水系统的微生物及控制	283
一、微生物的基本知识	283
二、冷却水系统中常见的微生物	286
三、冷却水系统微生物的控制	297

四、杀生(菌)剂及其应用	300
第四节 循环冷却水系统的正常运行	311
一、冷却水系统的清洗和预膜	311
二、循环冷却水的正常运行	320
第五节 循环冷却水的其他处理方法	336
一、磁化法水原理	336
二、磁处理水的阻垢作用	338
三、磁处理水的其他作用	343
四、磁处理法的适用条件	346
第五章 污水的深度处理技术及再利用	349
第一节 水处理及循环再利用的意义	349
一、水处理及循环再利用的必要性	349
二、实施污水资源化的可行性分析	350
三、水处理及循环和再利用技术实施中应注意的问题	356
第二节 污水回用系统	359
一、城市污水处理厂出水的回用	359
二、工业废水的回用系统	361
第三节 污水回用处理技术和工艺	362
一、传统深度处理工艺	362
二、连续微孔过滤(CMF)应用技术	362
三、膜生物反应器	368
四、回用水的典型处理工艺流程	375
第四节 污水处理后的再利用	376
一、城市污水处理厂出水的处理和回用	376
二、工业废水的处理和回用	387
主要参考文献	400

第一章 绪 论

随着地球人口爆炸式的增长和工业革命以来世界范围内物质文明的发展与普及，地球环境、资源的问题愈来愈引起人们的关心和担忧。

人类所面临最大的课题是从根本上重新认识物质文明，恢复和环境的协调与共存。即人类应由以自己为中心的生物回归到地球型生物，应该超越个人生命价值至高无上的生命伦理观念，建立维持地球生物圈为大前提的环境伦理观念。这就要求人类的伦理、生活方式、经济体系、工业技术等发生根本的变革。

为了解决地球环境问题，人们提出了各种各样的方案，其中最具有现实意义的是工业生态学（Industrial Ecology）的概念。它提倡资源、环境和持续发展协调和统一。目前又提出了生产过程实现循环经济，即最大限度地综合利用资源及其副产品，减少或根除污染。

目前，世界性水资源短缺和水污染是人们最关心的问题之一。水资源可持续利用与水回用技术研究、开发、应用得到了极大的重视。在欧洲、美国、加拿大、日本等发达国家，水的重复利用率已高达 80% ~ 90%，例如：法国巴黎的人均水资源拥有量是 2000m³，但是，塞纳河在入海之前，河水要循环使用 9 次；尼罗河河水则更要循环用到 50 次。中国被联合国列为世界上 13 个最缺水的国家之一，有 18 个省、市、自治区的人均水资源量低于联合国可持续发展委员会审议的人均占有水资源量 2000m³，其中有 10 个省、市、自治区低于 1000m³ 的生存起码线。淡水资源不足是中国最严重的资源问题之一。一方面，缺水形势严峻；另一方面，地表水（江河、湖泊）、地下水污染严重。水污染已经成为中国最主要的水环境问题。

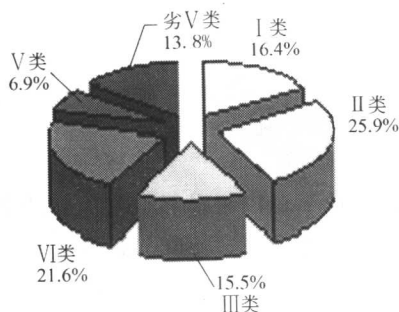


图 1-1 2000 年度七大水系水质类别比例

2000 年，中国七大重点流域地表水有机污染普遍，各流域干流有 57.7% 的断面满足 III 类水质要求，21.6% 的断面为 IV 类水质，6.9% 的断面属 V 类水质，13.8% 的断面属劣 V 类水质（见图 1-1）。主要湖泊富营养化问题突出。2001 年度七大水系监测的 752 个重点断面中，I ~ III 类水质占 29.5%，IV 类水质占 17.7%，

V 类和劣 V 类水质占 52.8%。其中，七大水系干流 154 个国控断面中，I ~ III 类水质断面占 50.6%，IV 类占 26.0%，V 类和劣 V 类占 23.4%（见图 1-2）。各水系干流水质好于支流。2001 年度七大水系污染由重到轻的顺序依次是：海河、辽河、淮河、黄河、松花江、长江和珠江。与上年相比，污染轻重顺序未变，污染程度相近。

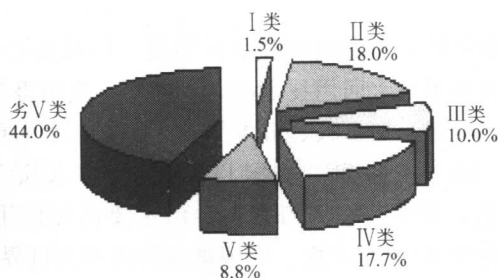


图 1-2 2001 年度七大水系水质类别比例

由于地表水资源贫乏和水污染加剧，地下水超采现象十分严重。据不完全统计，全国目前已形成许多地下水区域性“降落漏斗”，有的“漏斗”中心水位深已达 60~80m，有些城市还出现了地面沉降。由于地下水位持续下降，沿海一些地区从 20 世纪 70 年

代中期开始陆续发生海水入侵陆地含水层。与此同时,由于水资源短缺,水体稀释能力低,导致水环境更趋恶化。地表水污染通过入渗殃及地下水,加之化肥、农药的不合理使用,使地下水水质每况愈下,水土流失严重。

因此,一方面要大力提倡和实行绿色生产、绿色消费,降低原材料、资源和能源的消耗,提高原材料、资源与能源的使用效率;另一方面要对废副产品、资源和能源进行回收、净化和循环利用,这样在节约原材料、资源和能源的同时又能保护环境,维持经济可持续发展所需的必要条件。随着人类对自身与环境的关系认识的不断提高,水资源可持续利用的理念与水回用技术越来越受到重视并不断地得到发展。

第一节 水在自然界中的循环和水资源的分布

一、水在自然界中的循环

在自然界中,水是地球的重要组成部分。水是生命机体不可缺少的成分。

水在自然界中并不是静止不动的,它在太阳辐射和地心引力等影响下不停地流动和转化。海洋、湖泊等水面受太阳的照射而蒸发,蒸汽升入天空为云,在适当条件下又降落为雨或雪,称为降水。降落在陆地上的水又分成两路流动,一路在地面上汇集成江河湖泊,称为地面径流;另一路渗入地下,形成地下水层或水流,称为地下渗流。最后这两路水流都流入海洋或湖泊。高山冰川融化的水常是河流湖泊的发源地,源源不断地补充水源。地面森林草原也会蒸发大量水分。自然界中的水始终这样周而复始地运动,形成水的自然循环。如图 1-3 所示。

二、水资源的分布

在自然界中,水分布在海洋、河流、湖泊、地下水、冰川、积雪、土壤、动植物和大气中,总共约有 $1.4 \times 10^{19} \text{ m}^3$ 。如果将其平铺在地球表面,水层厚度可达到约 3000m。但是,自然界的水绝大部分是咸的海水,加上内陆地表咸水湖、地下咸水,共约占

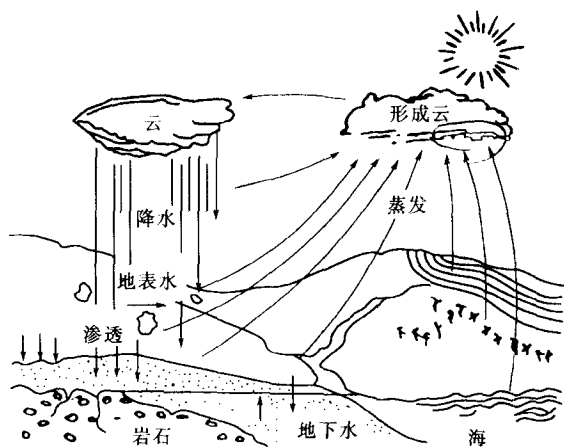


图 1-3 水在自然界中的循环

总水量的 98%，而冰川、积雪约占总水量的 1.7%，这些水目前尚难以开发利用。实际上可供开发利用的淡水只占总水量的 0.3%，约为 $4 \times 10^{16} \text{m}^3$ 。淡水储量分布如表 1-1 所示。

表 1-1 全世界淡水储量分布

分 布	比率/%	分 布	比率/%
两极地区的冰川和冰山	76	土壤中水分	0.18
埋深 800~4000m 的地下水	13	大气水分	0.036
埋深 800m 以内的地下水	10	冰川	0.454
湖泊	0.33		

因此，水在自然界中虽然是一种分布最广的资源，但淡水却是非常有限的宝贵资源。它的开发量严格地受到时间与空间的制约，在一定的地区，每年、每季、每月、每个时间段内，所能取得的水量都不同。

三、我国天然水的分布

我国河流、湖泊众多，水量丰沛。根据一些特征，天然水的分布基本上可分为 4 个区：潮湿区、湿润区、过渡区和干旱区，这是

第一章 绪 论

由气候、地形、土壤、地质等各种条件决定的。它们的降水和径流量、含沙量、浑浊度、含盐量及化学组成等各有特点（见表 1-2）。

表 1-2 我国各地区的水质情况

水质特征 \ 分区	潮湿区	湿润区	过渡区	干旱区
年降水量/mm	>1 600	800~1 600	400~800	<400
年径流量/ 10^8m^3	>1000	100~1 000	25~100	<25
平均含沙量/(kg/m^3)	0.1~0.3	0.2~5	1~30	—
常见浑浊度/(mg/L)	10~300	100~2000	500~20000	—
含盐量/(mg/L)	<100	100~300	200~500	>500
总硬度/(mmol/L)	<0.5	0.5~1.5	1.5~3.0	>3.0
pH 值	6.0~7.0	6.5~7.5	7.0~8.0	7.5~8.0 以上
地区范围	东南沿海	长江流域、西南地区、黑龙江、松花江流域	黄河流域、河北地区、辽河地区	内蒙古地区、西北地区

（一）潮湿区

潮湿区为东南沿海地区。降水量丰富而蒸发量小，因而径流量大。土壤层薄，多坚硬花岗岩地层，故河水含沙量低、浑浊度低，一般在 $10\text{mg}/\text{L}$ 左右。土壤经多年淋浴，可溶性盐已流失，所以水的含盐量低，硬度也低，属软水。水中主要化学组成为碳酸氢钙和碳酸氢钠等。

（二）湿润区

湿润区为长江流域及其以南地区，黑龙江和松花江流域之间的地区也属湿润区。该区降水充足，蒸发量不大，故径流量较大。长江上游如金沙江、嘉陵江等江段含沙量较大，浑浊度可达 $1000\text{mg}/\text{L}$ 以上。由于区内降水充足，径流量大，所以含盐量一般不高，在 $200\text{mg}/\text{L}$ 左右。但在贵州、广西地区有石灰岩溶洞，水的硬度增大。在长江流域，水中主要化学组成为碳酸氢钙类，在东北地区也含有碳酸氢钠等。

(三) 过渡区

过渡区为黄河流域及其以北地区，直到辽河流域。该区降水量较少，蒸发量较大，故径流量不大，水量贫乏。黄河虽为我国第二大河，但年径流量只有长江的约 $1/20$ 。黄河流经黄土高原，冲刷大量泥沙，浑浊度极高。由于径流量小，水的含盐量较高，因而硬度高。水中主要组成为碳酸氢钙类，但也有相当多的地方为碳酸氢钠类，甚至出现硫酸盐类或氯化物类。

(四) 干旱区

干旱区为内蒙古和西北大片地区。该区降水量少而蒸发强烈，因此形成径流量很低的干旱地带。由于径流量小，土壤中可溶性盐含量高，所以水的含盐量和硬度都很高。水中主要组成是硫酸盐或氯化物类。

第二节 水 的 特 点

一、天然水的成分

天然水源包括地面水——江、河、湖、海和地下水。水是由两个体积的氢和一个体积的氧结合而成，但是水在自然循环过程中（如图 1-3 所示），由于接触了大气、泥土、沼泽、岩石等自然界物质，使得水中混进了一些杂质；另外水是一种良好的溶剂，混进水中的杂质一部分溶解在水中，另一部分则是悬浮于水中，这就使得水的物理化学性质起了变化。三废的排放，更使得水的成分趋于复杂。

天然水源在自然循环过程中不可避免地要带进一些杂质。水的蒸发和大气降水（雨、雪）以及在流动过程中，因所接触环境的不同，带进水中的杂质也是各种各样的。例如雨、雪在形成和降落过程中，溶入了大气中的氧、二氧化碳和氮等气体，同时也溶解或吸收了包括城镇工业区大气中可溶的和不可溶的无机物、有机物、尘埃、二氧化硫、硫化氢以及微生物等杂质；在靠近沿海海岸地区的雨水中，由风卷送的海水飞沫，则含有一些氯化钠。

大气降水降到地面，沿地球表面径流和渗流进入地下的过程

第一章 绪 论

中，地球表壳和地层土壤、岩层的一些物质被挟带或溶入水中。地球表壳的化学成分如表 1-3 所示。因此，未污染的天然水中所含的杂质主要是无机物。总的来讲，天然水中的杂质成分及其含量决定于环境、气候、地质、地理以及人类的社会活动。

表 1-3 地球表壳的化学成分

成分	含量/%	成分	含量/%	成分	含量/%	成分	含量/%
氧	16.1	钾	2.60	氟	0.077	碳	0.027
二氧化硅	27.8	镁	2.09	氯	0.055	镍	0.019
铝	8.13	钛	0.629	硫	0.052	锶	0.018
铁	5.12	磷	0.130	钡	0.049	锂	0.0033
钙	3.63	氢	0.127	铬	0.037	铜	0.002
钠	2.85	锰	0.106	钴	0.028		

从水处理的角度来讲，天然水中的杂质可按它们在水中存在的状态分为三类：悬浮物、胶体和溶解物。杂质在水中存在的状态，主要决定于杂质颗粒的大小。杂质在水中状态类别如表 1-4 所示。

表 1-4 天然水中的杂质状态及类别

杂质状态	真溶液	胶体	悬浊液
分散颗粒	低分子、离子	胶体颗粒	悬浮物
颗粒尺寸/nm	0.05~1	1~200	0.2~200
外观	透明	光照下浑浊	浑浊
运动状态	布朗运动	布朗运动	>10 μ m 出现 重力沉降现象
观测方法	质子显微镜	电子显微镜或超显微镜	一般显微镜或肉眼

(一) 悬浮物

悬浮物是颗粒尺寸大于 10^{-4} mm 的微粒。水发生浑浊现象，主要是由这类物质所造成的。悬浮物的主要特性是：它们常常是浮在水流中，但在流速降低或静置时可以分离出来，较重的颗粒下

沉,较轻的颗粒则上浮于水面。下沉的颗粒主要是泥砂和大颗粒黏土类的无机化合物;上浮于水面的颗粒主要是浮游生物,如藻类、细菌或原生动物和死亡残骸等,这类杂质颗粒属于有机化合物,有些来自废水有机物污染。

悬浮物能使天然水产生浑浊现象,但浊度并不等于悬浮物的含量。虽然浊度也常用产生浑浊的物质质量来表示,1L水中含有1mg白陶土或高岭土时产生的浑浊程度,称为1度或1mg/L。悬浮物质的含量是水中可以用滤纸截留的物质的质量,而浊度则是一种光学效应,它表示光线透过水层时所发生阻碍的程度。这种光学效应和颗粒大小、形状、杂质含量和表面反射性有关,从胶体颗粒到悬浮颗粒都能使水产生浑浊现象,其颗粒大小变化幅度是很大的,所以两种天然水尽管悬浮物含量是相同的,但当颗粒形状、粒径分级状况不同,所形成的浑浊度是有差别的。

(二) 胶体

胶体是颗粒尺寸在 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ mm之间的微粒,它是由许多分子和离子形成的。这些微粒的特殊性是由于它的比表面积很大所产生的。比表面积是指单位体积所具有的表面积。如将一粒 1cm^3 的物质分割成比 $1\mu\text{m}^3$ 小的颗粒,它的接触面积就比原来的颗粒增大6万倍以上。这样巨大的接触表面积使胶体颗粒产生了特殊的吸附能力和溶解现象,胶体颗粒的带电现象也由此而产生,结果使同类胶体因为带有同性负电荷而互相排斥。因此,胶体颗粒在水中非常稳定,静置很长时间甚至数年也不会下沉或上浮。

天然水中分子和离子集合体的胶体微粒,主要是黏土胶体和硅酸胶体等,属于无机物;天然水中有机物分解的产物,如蛋白质和腐殖质,属于高分子有机胶体。此外,某些尺寸较小的细菌、病毒,以及污水中的有机污染物等也多为胶体。胶体微粒当光线照射时即被散射而使水呈浑浊现象,有机胶体微粒往往能使水带色,如腐殖质的存在常使水体变为黄绿色或褐色。

(三) 溶解物质

在天然水中形成真溶液状态的低分子和离子的物质,其颗粒尺

寸均小于 10^{-6} mm, 光线照射时能全部通过。尽管这类物质在天然水中含量很高, 而水的外观仍是清澈透明的。以低分子状态存在于水中的主要是氧、二氧化碳等, 以离子状态存在于水中的是溶解的无机盐类, 基本上以阳离子和阴离子的形式存在。一般在天然水中最常见的而且含量较多的阳离子有钙离子(Ca^{2+})、镁离子(Mg^{2+})、钠离子(Na^{+})、钾离子(K^{+}); 阴离子有碳酸氢根(HCO_3^{-})、硫酸根(SO_4^{2-})和氯根(Cl^{-})。

水中的阳离子带正电荷, 阴离子带负电荷, 而阳离子所带的正电荷与阴离子所带的负电荷在数量上应是相等的。根据水中的阳离子与阴离子的组合关系, 从水处理的角度, 可把它们组成假想的化合物。根据所形成化合物溶解度大小顺序, 溶解度小的化合物优先组合出来, 溶解度大的化合物则后组合出来。

在天然水质中只出现 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ 三类阳离子时, Ca^{2+} 首先和阴离子组合, 然后 Mg^{2+} 和剩余的阴离子组合, 而 $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ 最后与所剩下的阴离子组合。

在天然水质中只出现 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} 三种阴离子时, 首先是 HCO_3^{-} 与阳离子 Ca^{2+} 产生 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, 然后 SO_4^{2-} 和剩余的 Ca^{2+} 组合成 CaSO_4 , 最后 Cl^{-} 与所剩下的 Ca^{2+} 组合成 CaCl_2 。

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量的总和称做水的总硬度。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量分别称作钙硬度和镁硬度。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的碳酸氢盐、碳酸盐的总和, 称作碳酸盐硬度。由于天然水中碳酸根(CO_3^{2-})含量较少, 所以一般将碳酸盐硬度看做 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的碳酸氢盐。水的总硬度与碳酸盐硬度之差, 称作非碳酸盐硬度, 如钙、镁的硫酸盐和氯化物。

二、天然水源的水质概况

不同的水源, 水中杂质的种类和数量各不相同, 即使是同一水源, 其杂质成分与含量也随着地点、时间、地质、气象条件的不同而有所变化。以江、河水为例, 河道的上游和下游、冬季和夏季、晴天和雨天, 水质是有差别的, 有时差别很大。下面就天然水源的水质情况分别进行讨论。