

水处理化学

王九思 陈学民 肖举强 伏小勇 编著

SHUI CHULI HUAXUE



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

水 处 理 化 学

王九思 陈学民 肖举强 伏小勇 编著

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

水处理化学/王九思等编著. —北京:化学工业出版社,
2002.5
ISBN 7-5025-3813-5

I. 水… II. 王… III. 水处理 IV. TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 026745 号

水处理化学

王九思 陈学民 肖举强 伏小勇 编著

责任编辑:王秀鸾 赵晓怡

责任校对:郑捷

封面设计:张昊

*

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

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市宝新装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 19½ 字数 488 千字

2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3813-5/X·203

定 价: 45.00 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

随着水资源紧张加剧，水污染问题日益严重，水处理技术、理论不断得到发展、完善。水处理化学就是人类不断与环境斗争而在生产实践中发展起来的一门新兴学科。水工建筑、医疗卫生、工农渔业都需要了解水质及各种水化学反应过程以达到改善水质、满足用水要求的目的。目前有关水处理中化学反应的原理、模式、规律等的论著、文献较多，关于各种水处理工程的工艺、处理方法、设计和运行等也有很详细的专著或论述，而将水化学理论和水处理工艺有机结合的专著较少。本书试图从这两者的结合点上做一些探索，以化学原理为主线，介绍水化学基本理论及其在水处理中的应用实例。

王九思编写了第2、3、4、6章，陈学民编写了第9、10、11、12章，肖举强编写了第4、7、12、13、14、15章，伏小勇编写了第1、3、5、8章。

在本书的编写过程中得到了王三反教授的指导和辛言君同志的大力帮助，许多专家也为本书的编写提供了宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于编写人员水平有限，时间仓促，书中漏误之处在所难免，请读者批评指正。

编者

2002.2

1/11 22/06

目 录

1 绪论	1
1.1 水处理化学的研究范围和方法	1
1.2 水、水的组成及性质	1
1.3 水质指标和水质标准	6
2 化学反应的基本原理	11
2.1 化学热力学	11
2.2 化学反应的方向和吉布斯函数	15
2.3 化学反应进行的程度和化学平衡	20
2.4 化学反应速率	22
3 酸碱化学	32
3.1 原理	32
3.2 绘制平衡图的近似方法	43
3.3 碱度和酸度	45
3.4 碳酸系统	48
3.5 水系统的缓冲作用	51
3.6 碱度测定	60
4 配位化学	62
4.1 水体中的配合作用	62
4.2 配合物的定义及形成	62
4.3 配位反应的速率	63
4.4 水溶液中配合物的稳定性和平衡计算	64
4.5 水溶液中的羟基配合物	68
4.6 其他无机配位体的配合物	72
4.7 螯合剂 NTA 的配合作用	75
4.8 腐殖质的特性及与金属离子的配合作用	80
4.9 有机配位体对重金属迁移的影响	83
5 化学沉淀	85
5.1 微溶盐类的溶解平衡	85
5.2 其他溶质对溶解度的影响	87
5.3 水和废水中重金属的去除	99
6 氧化还原反应	101
6.1 氧化还原过程	101
6.2 原电池和化学热力学	102
6.3 稳定性图解	105
6.4 氧化还原电位的测定	110

6.5 氧化还原的应用	112
7 磷酸盐化学	127
7.1 概述	127
7.2 磷酸钙的沉淀作用	127
7.3 磷酸铵镁的沉淀作用	131
7.4 磷酸铁的沉淀作用	132
7.5 磷酸铝的沉淀作用	134
7.6 含磷阻垢剂	136
8 化学絮凝	141
8.1 胶体的脱稳作用	141
8.2 化学絮凝作用	144
8.3 快速混合絮凝作用	151
9 水质稳定	155
9.1 电化学腐蚀	155
9.2 水质稳定	156
10 水的软化	168
10.1 概述	168
10.2 药剂软化法	169
10.3 软化药剂用量的计算	170
10.4 中和作用	176
10.5 平衡计算	179
10.6 分流处理	185
10.7 离子交换	188
11 离子交换	189
11.1 基本原理	189
11.2 树脂类型	194
11.3 离子交换树脂的基本性能	195
11.4 离子交换软化方法与系统	204
11.5 离子交换软化装置	211
12 界面吸附与膜分离	218
12.1 表面张力与表面自由能	218
12.2 润湿作用	219
12.3 溶液表面吸附	220
12.4 表面活性物质及应用	221
12.5 乳状液和泡沫	224
12.6 固体吸附作用	228
12.7 膜分离技术	230
13 活性炭应用技术	234
13.1 概述	234
13.2 活性炭的品种类别	234

13.3	活性炭吸附机理·····	237
13.4	吸附操作方式与设计·····	245
14	氟化物的去除·····	250
14.1	氟的性质、分布及危害·····	250
14.2	混凝沉淀法除氟·····	251
14.3	吸附与离子交换法·····	253
14.4	废水中氟化物的去除·····	258
15	地下水中铁和锰的去除·····	261
15.1	水中铁和锰的危害·····	261
15.2	除铁除锰的化学理论基础·····	262
15.3	接触氧化法除铁除锰·····	271
15.4	地下水的其他除铁除锰方法·····	275
	主要参考文献·····	281
	附录·····	283

1 绪 论

1.1 水处理化学的研究范围和方法

水处理化学是一门综合性很强的应用化学，它是以各种水质系为研究对象（其中包括天然水、生活饮用水、各种生产用水、生活污水和各种工业废水），以解决各种水质问题为目标，探讨各种水质系的水质变化和某些水处理的原理，研究水中存在的各种物质及其相互的化学作用。水处理化学的主要依据是化学基础理论，然而，整个地球是一个“生态系统”，在这里，水、大气、岩石、生物和人类的活动都相互影响，所以对于水处理化学的研究必然涉及其他一些学科，如生物、地质、水文等。

水处理化学是从生产实践中发展起来的科学，水工建筑需要了解水质对水工建筑的影响；医疗卫生需要了解水质对人类饮用的影响；工业部门需了解水质是否适合于锅炉工业及循环冷却用水；农、渔业需了解水质是否适合于灌溉或养殖。

水处理化学的研究途径为，按照化学热力学判断化学反应能否发生以及反应可以到达的极限；按照化学动力学研究化学反应的历程和反应速度。可是实际上，由于人们对水域中化学反应动力学的基本数据掌握得不多，以至于动力学的应用常遇到困难，所以对于水处理化学中化学过程的探讨常常侧重于化学热力学方面。

由于自然界中物质变化规律的复杂性，完全按照实际情况来研究是很困难的。因此，对于此类问题，通常需要借助于较简单的理想化模式进行研究，同时还结合图算法。这样，通常可以把许多复杂的关系反应在简明的图表上。此种方法可以使问题简化，所得结果也较正确，而且表示的方式很直观。所以，这是水处理化学常用的方法。

1.2 水、水的组成及性质

1.2.1 水的起源和分布

关于水的起源，比较普遍的看法是认为在地球形成的开始阶段，由于大规模的活动释放出大量挥发气体，这些气体的主要成分是水蒸气、二氧化碳、氮气和其他微量气体。水蒸气凝结为液态的水降落到地壳表面，汇集到地壳低洼的地方，就形成现今的海洋和湖泊。

地球表面、岩石圈内、大气层中、生物体内所有各种形态的水，包括海洋水、冰川水、湖泊水、沼泽水、河流水、地下水、土壤水、大气水和生物水，在全球形成一个完整的水系统，这就是水圈。水圈中的水约 $1.386 \times 10^{18} \text{m}^3$ （见表 1-1），其中约有 $1.338 \times 10^{18} \text{m}^3$ 分布在面积为 $3.61 \times 10^8 \text{km}^2$ 的海洋中，占全球水总储量的 96.5%； $1.49 \times 10^8 \text{km}^2$ 陆地上的各种水体，其储量约为 $4.8 \times 10^{16} \text{m}^3$ ，占全球水总储量的 3.5%；大气水和生物体内的水仅 $1.4 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，只占 0.001%。在陆地水储量中，有 73%，即 $3.503 \times 10^{16} \text{m}^3$ 为淡水，占全球水储量的 2.53%。在陆地淡水中，只有 30.4%，即 $1.065 \times 10^{16} \text{m}^3$ 分布在湖泊、沼泽、河流、土壤和地下 600m 以内含水层中，其余 69.6% 分布在两极冰川与雪盖、高山冰川和永久冻土层中，难以利用。

表 1-1 地球上水资源的分布

水体种类	水 储 量		咸 水		淡 水	
	/10 ¹² m ³	/%	/10 ¹² m ³	/%	/10 ¹² m ³	/%
海洋水	1338000	96.538	1338000	99.041		
冰川与永久积雪	24064.1	1.7362			24064.1	68.6973
地下水	23400	1.6883	12870	0.9527	10530	30.0606
永冻层中的冰	300	0.0216			300	0.8564
湖泊水	176.4	0.0127	85.4	0.0063	91	0.2598
土壤水	16.5	0.0012			16.5	0.0471
大气水	12.9	0.0009			12.9	0.0368
沼泽水	11.47	0.0008			11.47	0.0327
河流水	2.12	0.0002			2.12	0.0061
生物水	1.12	0.0001			1.12	0.0032
总计	1385984.61	100	1350955.4	100	35029.21	100

河川径流量（包含大气降水和高山冰川融水形成的动态地表水）和由降水补给的浅层动态地下水，基本上反映了动态水资源的数量和特征，所以世界各国通常用河川径流量近似表示动态水资源量。根据水文测验资料以及与径流有关的因素推算，全世界多年平均径流总量为 $4.68 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，其中河川径流量为 $4.45 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，冰川径流量为 $2.3 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。河川径流中有 $4.35 \times 10^{13} \text{m}^3$ 流入海洋，其余 $1.0 \times 10^{12} \text{m}^3$ 排入内陆湖。径流量的地区分布和人口分布并不相适应，有人居住和适合人类活动的地区，约有年径流量 $1.9 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，占世界径流总量的 40.6%。

各大洲的自然条件差别很大，降水、径流的地区分布很不均匀（见表 1-2）。大洋洲各岛屿的水资源最为丰富，平均年降水量达到 2700mm，年径流深超过 1500mm。南美洲的水资源也较丰富，平均年降水量为 1600mm，年径流深为 660mm，降雨、径流约相当于全球陆地平均值的两倍。澳大利亚是水资源最贫乏的大陆，平均年降水量约 460mm，年径流深只有 40mm，有 2/3 的面积为无永久性河流的荒漠、半荒漠，年降水量不足 300mm。欧洲、亚洲、北美洲的水资源条件中等，年降水量和年径流深均接近全球陆地平均值。非洲有大面积的沙漠，年降水量虽然接近全球陆地平均值，但年径流深仅有 150mm，不到全球平均水平的一半。南极洲的降水量很少，年平均只有 165mm，没有一条永久性河流，然而却以冰川的形态储存了地球淡水总量的 62%。

表 1-2 世界各大洲的年降水和年径流分布

地 区	面积 /10 ⁴ km ²	年 降 水		年 径 流		径流系数
		/mm	/10 ¹² m ³	/mm	/10 ¹² m ³	
欧洲	1050	790	8.29	306	3.21	0.39
亚洲	4347.5	741	32.2	332	14.41	0.45
非洲	3012	740	22.3	151	4.57	0.2
北美洲	2420	756	18.3	339	8.2	0.45
南美洲	1780	1596	28.4	661	11.76	0.41
大洋洲岛屿	133.5	2704	3.61	1566	2.09	0.58
澳大利亚	761.5	456	3.47	39	0.3	0.09
南极洲	1398	165	2.31	165	2.31	1
全球陆地	14902.5	798	118.88	314	46.85	0.39

从世界各国拥有的水资源量来看，居第一位的是巴西，其次按顺序是前苏联、加拿大、

美国、印尼和中国。这 6 个国家的年径流量共计为 $2.15 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，占世界年径流总量的 46%（见表 1-3）。亚洲国家中年径流深最大的是印度尼西亚和日本，接近 1500mm。欧洲国家中年径流深最大的是挪威，为 1250mm。

表 1-3 世界一些国家的年径流量和人均水量、耕地亩均水量

国 家	年径流量 /10 ⁸ m ³	年径流深 /mm	人均水量 /m ³	耕地亩均水量 /m ³
巴 西	51912	609	42210	10700
原苏联	47140	211	17860	1390
加拿大	31220	313	130080	4770
美 国	29709	317	13500	1050
印 尼	28113	1476	18990	13200
中 国	27115	284	2474	1888
印 度	17800	514	2630	720
日 本	5470	1470	4720	8420
全世界	468500	314	9360	2353

各大洲自然条件不同，经济和社会发展水平差异很大，有关水资源的社会经济指标也各不相同（见表 1-4），其中，南极洲终年冰天雪地，至今除极少数探险家及科学工作站外，渺无人烟。亚洲人口最多，耕地面积也最大；大洋洲岛屿人口稀少，人均水资源的量最大，约为全世界平均的 24 倍多。

表 1-4 各大洲水资源人均和单位耕地面积平均值(1986 年)

洲 名	人口 10 ⁴ 人	耕地面积 /10 ⁴ hm ²	灌溉面积 /10 ⁴ hm ²	水电装 机容量 /10 ⁴ kW	水资源 总量 /10 ³ km ³	人均水量 /m ³	单位耕地面 积均水量 /m ³	人均灌 溉面积 /hm ²	人均水 电装机 容量/kW
亚洲	286449.1	42407.0	13827.9	10589.0	14.41	5031	33980	0.048	0.037
非洲	57189.5	16635.9	1062.6	1690.4	4.57	7991	48035	0.019	0.030
北美洲	40689.7	26786.8	2536.1	15015.5	8.20	20152	30612	0.062	0.369
南美洲	27337.2	11500.8	813.1	6018.1	11.76	43018	102254	0.093	0.220
欧洲	49396.5	22780.0	1609.3	15956.5	3.21	6498	140913	0.033	0.323
澳洲	1588.8	4842.7	162.0	702.9	0.30	18882	6195	0.102	0.442
大洋洲(各岛)	907.0	85.3	25.1	495.8	2.09	2304202	450176	0.028	0.547
世界	491565.2	137573.6	22031.0	56682.3	46.85	9531	34054	0.045	0.115

1.2.2 水的循环

水的循环包括自然循环和社会循环。

1.2.2.1 自然循环

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的影响下不停地流动和转化。海洋、湖泊等水面受阳光照射而蒸发，升入高空成为云，在适当条件下又以降水形式回归陆地、海洋。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、湖泊等，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。高山冰川融化的水常是河流、湖泊的发源地。地面、森林、草原也会蒸发大量水分。大自然中水始终这样周而复始地运动着，构成水的自然循环，如图 1-1 所示。

1.2.2.2 社会循环

人类社会为了满足生活和生产上的需要，从天然水体取用大量的水，在使用过程中混入

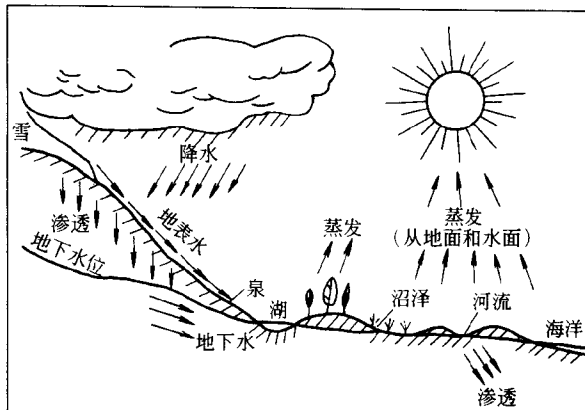


图 1-1 水的自然循环

的杂质使水受到不同程度的污染，生活污水和工业废水不断地排入天然水体，构成了水的社会循环过程。

社会循环的水量仅占地球总水量的几百万分之一。然而，却表现出人对自然界中水的良性循环产生的负面效应。

水在自然循环和社会循环过程中总会混入多种多样的杂质，其中包括自然界各种地球化学和生物过程的产物，也包括人类生活和生产的各种废弃物。当水中某些杂质的数量达到一定程度后，水质就发生了变化，就会对人类生存环境和水的利用产生不良影响。

1.2.3 水的组成

水通常含有数量不等的其他物质，这些物质包括溶存气体物、溶存固体物及悬浮固体物等。

1.2.3.1 溶存气体物

水中含有的溶存气体物通常包括氧气 (O_2)、氮气 (N_2)、二氧化碳 (CO_2) 等。氮气是一种惰性气体，当水作为工业传热介质使用时，可不考虑其影响。

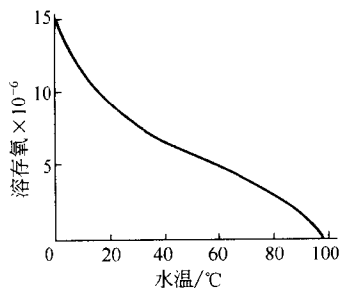
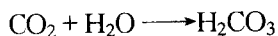


图 1-2 水中含溶存氧的浓度与水温的关系

氧气是对人类活动影响较大的溶存气体之一。它是导致水中金属腐蚀的最重要原因之一。

水中所含有溶存氧量随水温的增加降低 (如图 1-2)。通常情况下温度每增加 $10^{\circ}C$ ，氧的化学反应速率增加一倍，所以热水管路的腐蚀往往较冷水管路严重。

二氧化碳来自动物呼吸过程和人类活动所排放的废气等，如锅炉排放烟气、汽车尾气等。但其最大的来源则是土壤中的有机物腐化过程中分解释放出二氧化碳。当二氧化碳溶解水中时，就会发生化学反应形成碳酸：



进而分解成氢离子及碳酸氢根离子：



这种化学反应会使水的 pH 值降低，使水具腐蚀性。

1.2.3.2 溶存固体物

溶存固体物是指以溶解状态存在于水的固体物质，通常以离子形式存在，其溶存量的大小取决于固体物质的溶解度。

表 1-5 为水中常见的溶存固体物及对工业生产设备的影响。

表 1-5 水中的溶存固体物

溶存固体物	化学符号	可能会造成的困扰
钙离子	Ca^{2+}	当温度升高或其浓度增加时,在热交换器表面容易结生水垢
镁离子	Mg^{2+}	浓度升高时,会与阴离子(如磷酸根)结生水垢或泥垢
二氧化硅	SiO_2	结生水垢。冷却水要求 $c(\text{SiO}_2)$ 小于 150mg/L ,由于它易和氢氧化镁共沉积,因此要求 $c(\text{Mg})$ (以 CaCO_3 计) $\times c(\text{SiO}_2)$ (以 SiO_2 计) $< 15000 \sim 35000$
铁离子	Fe^{3+} 及 Fe^{2+}	沉积物的来源。过高含量使水发黄发涩,变色,增加细菌滋生,加快 CaCO_3 结晶生长,形成 Fe_2O_3 增加金属腐蚀
锰离子	Mn^{2+}	常与铁离子共存,影响也相同,浓度增加时,会导致沉积物
氯离子	Cl^-	可用来测浓缩倍数。浓度增加,会增加腐蚀速度。在冷却水中,对不锈钢设备要求 $c(\text{Cl}^-) \leq 300\text{mg/L}$,对碳钢要求 $c(\text{Cl}^-) \leq 500\text{mg/L}$
碳酸根	CO_3^{2-}	碱度缓冲剂,会转换成 CO_2 造成腐蚀
碳酸氢根	HCO_3^-	同碳酸根
氢氧根离子	OH^-	与 Fe^{3+} 会形成氢氧化铁沉积物
硝酸根	NO_3^-	对冷却水系统没有什么影响
磷酸根	PO_4^{3-}	能与阳离子(如钙离子)结生水垢沉积物
硫酸根	SO_4^{2-}	能与阳离子(如钙离子)结生水垢。 $c(\text{Ca}^{2+})$ (以 CaCO_3 计) $\times c(\text{SO}_4^{2-}) \leq 50000$ 为宜。 过高的 SO_4^{2-} 还是硫酸盐还原菌的营养源
钠离子	Na^+	能与阴离子作用,但因其在水中的溶解度高,因此不致形成困扰
钾离子	K^+	与钠离子同
铝离子	Al^{3+}	通常不存在于水中,除非铝金属遭受腐蚀,或预处理铝盐凝聚剂后移, Al^{3+} 浓度(以 Al_2O_3 计)大于 $1 \sim 3\text{mg/L}$,将会加速沉积物生成
钡离子	Ba^{2+}	与硫酸根会结硫酸钡水垢
铜离子	Cu^{2+}	可能导致金属管路点蚀,要求控制 $c(\text{Cu}^{2+}) \leq 0.5\text{mg/L}$
锌离子	Zn^{2+}	以抑制剂形态出现,在电化学腐蚀反应中可充当牺牲阳极,但对鱼类有害,排放要求 $c(\text{Zn}^{2+}) \leq 5\text{mg/L}$,渔场要求 $c(\text{Zn}^{2+}) \leq 0.1\text{mg/L}$ 。在 $\text{pH} \geq 8.3$ 时,发生锌沉积
铬酸根	CrO_4^{2-}	以抑制剂的形态出现
氟离子	F^-	对冷却水没有影响
硫离子	S^{2-}	有腐蚀性
亚硫酸根	SO_3^{2-}	与溶存氧作用会转换成硫酸根
亚硝酸根	NO_2^-	与溶存氧作用会转换成硝酸根

水中所含有的溶存固体物若超过其溶解度,就会在系统中形成沉淀。而溶存固体物的增加,会使水的电导率提高,增加水的腐蚀性。某些浓度的离子会影响其他离子的溶解度,通常冷却水或锅炉用水水质都有一定标准,以免对生产设备产生不利影响。

1.2.3.3 悬浮固体物

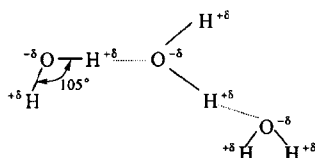
悬浮固体物包括未溶解的矿物质、有机碎物、泥浆、砂石、油污、微生物等,它们悬浮或分散于水中。在热交换器、锅炉或其他水处理设备中会因沉降而形成沉积物或黏泥。在水流动中会因冲击金属表面而造成摩擦腐蚀。同时也可能因摩擦而将金属表面的腐蚀抑制剂吸附膜损坏。

1.2.4 水的性质

水有 3 个主要特征:(a) 水是一种无色、无臭无味的液体,它是所有植物和动物生命的

基础，是来源最为广泛、廉价的溶剂。凝固点 0°C ，沸点 100°C ，相对密度 (4°C) 1.0000。(b) 存在形式多样，如雨、雪、生物水等。(c) 有各种形式的水体，如海洋、湖泊、河流和溪流等。

水的分子量为 18。由于氢和氧各有 3 个同位素，于是就存在着 18 种可能的水的分子量。在水分子中，两个氢原子都位于氧原子同一侧，它们与氧原子的键构成 105° 夹角。氢原子带一个正电荷，而氧原子是带负电荷的。由于这样的电荷分布， H_2O 是一个很强的极性分子。水分子的偶极互相吸引，并通过所谓的“氢键”的连接而形成聚集体：



有人认为在室温下水中这些聚集体可以达到大约 100 个水分子的大小。水的氢键是造成它具有很多反常性质的重要原因。水是氧的双氢化合物。假如将它与周期表中氧的各个同族元素的双氢化合物，即硫化氢 H_2S ；硒化氢 H_2Se ；碲化氢 H_2Te 来做一比较的话，我们就会发现它的很多物理性质是很异常的。在大气压和室温 (25°C) 下，较重的分子 H_2S (分子量 34)， H_2Se (分子量 81) 和 H_2Te (分子量 130) 都是气体，而水却是液体。只有当温度上升到 100°C 和 100°C 以上时，它才成为气体。在任何一个给定的温度下，水都远比其他上述有关化合物致密，它的最大密度在 4°C 之时。水的表面张力和介电常数都大大高于根据其他双氢化合物的性质而推算出的预计值。它的冰点也比预计的要低。水冻结而成为冰，这是一种开放结构的物质，其密度比形成它的液体水要低。所有这些性质（还有更多的）都是由水分子之间的氢键所引起的。

水是一种优良的溶剂。自然界中许多物质都可以溶于水中，这同时也使得水在循环过程中极易溶入杂质，遭受污染。

1.2.5 水的作用

从地球上生命的起源到人类社会的形成，从生产力低下的原始社会到科学技术发达的现代社会，人类与水结下了不解之缘。最早的生命诞生于水，生物的进化从水生到陆生，水是生命的摇篮，是人类和地球上一切生物得以生存和延续的重要物质基础。

水是人类宝贵的自然财富，是工农业生产不可缺少的物质资源。人们在生产实践中为创造物质财富而广泛使用水。除日常生活外，引水灌溉，水力发电等等也都使用水。随着现代化工业的迅速发展和城市人口的增加，水就成为城市的血液，如电力，冶金，化学和机械工业的循环冷却，印染，造纸工业的洗涤，食品工业以水作主要原料等，没有一种工业能离开水。

1.3 水质指标和水质标准

水质是指水及水中杂质共同表现的综合特性。水质好坏的衡量标准和尺度，就称为水质指标，水质指标表示水中杂质的种类和数量，它是判断水质能否满足某种特定要求的具体衡量尺度。同时针对水中存在的具体杂质或污染物，提出了相应的最低数量或浓度的限制和要求，即水质的质量标准。这些水质指标和水质标准着重于保障人体健康、保护鱼类和其他水生生物资源，满足工农业用水要求而提出的。

1.3.1 水质指标

1.3.1.1 物理指标

(1) 水温 水温是最常用的水质物理指标之一。由于水的许多物理特性、水中进行的化学过程和微生物过程都同温度有关，所以它经常是必须加以测定的。

(2) 嗅与味 被污染的水常会使人感觉到有不正常的气味，用鼻闻到的称为嗅，用口尝到的称为味，有时嗅和味不易截然分开。根据水的气味可推测水中所含的某些物质，但这一指标主要用于生活饮用水，是判断适合饮用与否的重要指标之一。

(3) 颜色和色度 纯净的水无色透明，混有杂质的水一般有色不透明。例如，天然水中含有黄腐酸而呈黄褐色，含有藻类的水而呈绿色或褐色；工业废水由于受到不同物质的污染，颜色各异。水中呈色的杂质可处于悬浮态、胶体或溶解状态，水的颜色可用表色和真色来描述。

表色为包括悬浮杂质在内的 3 种状态所构成的水色为“表色”。测定的是未经静置沉淀或离心的原始水样的颜色，只用定性文字描述。如废水和污水的颜色呈淡黄色、黄色、棕色、绿色、紫色等。当然，对含有泥土或其他分散很细的悬浮物水样，虽经适当预处理仍不透明时，也只测表色。

真色为除去悬浮杂质后的水，由胶体及溶解杂质所造成的颜色称为真色。水质分析中一般对天然水和饮用水的真色进行定量测定。并以色度作为一项水质指标，是水样的光学性质的反映。饮用水在颜色上加以限制，规定色度 <15 度。

对工业用水的颜色也有严格规定，如纺织用水色度 $<10\sim12$ 度，造纸用水色度 $<15\sim30$ 度，染色用水色度 <5 度。因此，对特殊工业水使用之前需要脱色处理。一些有色工业废水在排放之前也需要去色处理。

(4) 浊度 表示水中含有悬浮及胶体状态的杂质引起水的浑浊程度，并以浊度作单位，是天然水和饮用水的一项重要水质指标。这种浑浊对水的透明有影响，当浑浊度较高时，将引起水中生物生态发生变化。如生活污水和工业废水产生的浊度往往是有害的。地面水常含有泥沙、粘土、有机质、微生物、浮游生物以及无机物等悬浮物质而呈浑浊状态；如黄河、海河、长江等主要大河水都比较浑浊，其中黄河是典型的高浊度水河流。地下水比较清澈透明，浊度很小，但若其中溶有的 Fe^{2+} 氧化生成 Fe^{3+} ，就会使水呈黄色浑浊状态；生活污水和工业废水中含有各种有机物、无机物杂质、尤其悬浮状态污染物含量较大，因而大多数相当浑浊，一般只作悬浮物测定而不做浊度测定。

水中浊度是水可能受到污染的重要标志之一。浊度也是自来水厂处理设备选型和设计的重要参数，是水厂运行和投药量的重要控制标准，尤其用化学法处理饮用水或废水时，有时用浊度来控制化学药剂的投加量。我国饮用水标准规定浊度不超过 3 度，特殊情况下不得超过 5 度。为保证不结垢和堵塞以及产品的质量，某些工业用水对浊度有特殊要求，如冷却用水不得超过 $50\sim100$ 度，造纸用水不得超过 $2\sim5$ 度，纺织、漂染用水小于 5 度，半导体集成电路用水应为零。

(5) 固体含量 各种水中所含杂质常常大部分属于固体物质，经常有必要测定其重量作为直接的水质指标。各种固体含量可分为以下几种：a. 总固体即水样在一定温度下蒸发干燥后所残余的固体物质总量，也称为蒸发残余物；b. 悬浮性固体即当水样过滤后，滤后截留物蒸干后的残余固体量，也就是悬浮物质含量，其中包括不溶于水的泥土、有机物、微生物等；c. 溶解性固体即水样过滤后，滤过液蒸干的残余固体量，其中包括可溶于水的无机

盐类及有机物质。总固体量是悬浮性固体和溶解性固体二者之和。此外，还有可沉降固体、固体灼烧减重等指标。

固体含量高的水，一般不适于饮用，并可能对偶尔饮用者引起不适的生理反应，高度矿化的水对许多工业用水也不适用。我国饮用水中规定溶解性总固体不得大于 1000mg/L 。含有大量悬浮物的水，外观上不能满足诸如洗浴等的使用要求。

(6) 电导率 电导率又称比电导。电导率表示水溶液传导电流的能力。它可间接表示水中溶解性固体的相对含量。通常用于检验蒸馏水、去离子水或高纯水的纯度、监测水质受污染情况以及用于锅炉水和纯水制备中的自动控制等。

1.3.1.2 化学指标

(1) pH 值 水的 pH 值是溶液中氢离子浓度或活度的负对数， $\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$ 。表示水中酸、碱的强度，是常用的水质指标之一。 $\text{pH} = 7$ 水呈中性； pH 值 < 7 水呈酸性； pH 值 > 7 水呈碱性。 pH 值在水的化学混凝、消毒、软化、除盐、水质稳定、腐蚀控制及生物化学处理、污泥脱水等过程中是一重要因素和指标，对水中有毒物质的毒性和一些重金属络合物结构等都有重要影响。

一般天然水 pH 值在 $7.0 \sim 8.5$ ，各种用水和排放水对 pH 值都要有一定的要求，如饮用水规定 pH 值在 $6.5 \sim 8.5$ 之间；锅炉用水为防止金属被腐蚀，pH 值须保持在 $7.0 \sim 8.5$ 之间；工业排放水 pH 值须在 $6 \sim 9$ 之间等等。

(2) 酸度和碱度 水的酸度是水中给出质子物质的总量。水的碱度是水中接受质子物质的总量，酸度和碱度都是水的一种综合特性的度量，只有当水样中的化学成分已知时，它才被解释为具体的物质。

酸度包括强无机酸（如 HNO_3 、 HCl 、 H_2SO_4 等）、弱酸（如碳酸、醋酸、单宁酸等）和水解盐（如硫酸亚铁和硫酸铝等）。酸不仅有腐蚀性，而且对化学反应速率、化学物品的形态和生物过程等有影响。含有强酸的工业废水排放之前，必须进行中和处理。酸度的测定可反映水源水质的变化情况。测定的酸度数值大小与所用指示剂和滴定终点的 pH 值有关。酸度用 mg/L （以 CaCO_3 计）表示。

碱度包括水中重碳酸盐碱度（ HCO_3^- ）、碳酸盐碱度（ CO_3^{2-} ）和氢氧化物碱度（ OH^- ），水中的 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 OH^- 3 种离子的总量称为总碱度。一般天然水中只含有 HCO_3^- 碱度，碱性较强的水含有 CO_3^{2-} 和 OH^- 两种碱度。上述分类法是认为水中不存在弱无机酸或有机酸（如硅酸、磷酸和硼酸等）、并假定 HCO_3^- 与 OH^- 两种碱度不能共存。组成碱度的这些离子，一般不会造成危害，但它们同水中许多化学反应过程有密切关系，所以列为水质指标之一。水中碱度用 mg/L （以 CaCO_3 计）表示。

(3) 硬度 水的硬度原指沉淀肥皂的程度。一般定义为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的总量。硬度可分别表述为总硬度、碳酸盐硬度和非碳酸盐硬度。含有硬度的水不仅可与肥皂作用生成沉淀，造成肥皂浪费，而且会使锅炉对流传热管内壁产生水垢，影响热量传导，耗费大量燃料，甚至引起锅炉爆炸。因此，生活和生产用水对硬度都做了规定，如饮用水硬度 $\leq 450\text{mg/L}$ （以 CaCO_3 计）；锅炉用水硬度更有严格要求，如 $1.5 \sim 2.5\text{MPa}$ 水管锅炉用水硬度 $\leq 8.9\text{mg/L}$ （以 CaCO_3 计）。由于天然水中铁、锰、锶、铝等离子的含量很少，用 EDTA 络合滴定法测定时，硬度只以钙、镁含量计算。当然，如水样中其他阳离子含量较高时，也应考虑它们的影响。

由 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 和 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 及 MgCO_3 形成的硬度为碳酸盐硬度, 又称暂时硬度, 因这些盐类煮沸后就分解形成沉淀。由 CaSO_4 、 MgSO_4 、 CaCl_2 、 MgCl_2 、 CaSiO_3 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 等形成的硬度为非碳酸盐硬度, 又称永久硬度, 在常压下沸腾, 体积不变时, 它们不生成沉淀。

(4) 总含盐量 总含盐量又称全盐量, 也称矿化度。表示水中各种盐类的总和, 也就是水中全部阳离子和阴离子的总量。

总含盐量对农业用水尤其灌溉用水影响较大, 总含盐量过高会导致土壤的盐碱化。

(5) 有机污染物综合指标 有机污染物综合指标主要有溶解氧 (DO)、高锰酸盐指数、化学需氧量 (COD)、生物化学需氧量 (BOD_5)、总有机碳 (TOC)、总需氧量 (TOD) 和活性炭氯仿萃取物 (CCE) 等。这些综合指标可作为水中有机物总量的水质指标, 它们在水处理、水质分析中有着重要意义, 并得到广泛应用。

1.3.2 水质标准

水质标准是表示生活饮用水、工农业用水等各种用途的水中污染物质的最高容许浓度或限量阈值的具体限制和要求。因此, 水质标准实际是水的物理、化学和生物学的质量标准。这些水质标准保障了人群健康最基本的卫生条件, 并能满足各种用水, 以及对水源的保护要求。

水质标准分为国家正式颁布的统一规定和企业标准。前者是要求各个部门、企业单位都必须遵守的具有指令性和法律性的规定; 后者虽不具法律性, 但对水质提出的限制和要求, 在控制水质、保证产品质量方面有积极的参考价值。有关这些水质标准请详见附表。

1.3.2.1 生活饮用水卫生标准

生活饮用水水质标准是制约水厂向居民供应符合卫生要求的生活饮用水, 保障人群身体健康的基本要求。生活饮用水水质不应超过附录 1 所列限量。只有如此, 才能充分保证生活饮用水。

① 不仅感官性状无不良刺激或不愉快的感觉, 如饮用水中色度、浊度、嗅和味等符合标准外, 对水中由于氯消毒形成氯代酚而引起强烈臭味的挥发酚类化合物规定 $<0.002\text{mg/L}$; 使水产生金属涩味浑浊、并使衣服、瓷器产生铜绿的锌与铜规定均不超过 1.0mg/L 等等。

② 所含有害或有毒物质的浓度对人体健康不产生毒害和不良影响, 要求做到:

首先, 使毒理学上安全。对饮用水中有剧毒或毒性很大的氰化物、砷化物, (如砒霜) 和重金属 (如镉 Cd^{2+} 、汞 Hg^{2+} 、铬 $\text{Cr}(\text{VI})$ 和铅 Pb^{2+} 等) 的浓度都做了规定。例如氰化物 (CN^-)、砷 $\text{As}(\text{III})$ 、铬 $\text{Cr}(\text{VI})$ 和铅的浓度均要求 $<0.05\text{mg/L}$; 汞的浓度 $<0.001\text{mg/L}$; 镉的浓度 $<0.01\text{mg/L}$ 等。

第二, 生理上有益无害。饮用水中氟化物含量过高引起斑釉齿病、氟骨症, 但适量的氟又能提高牙齿的抗酸力, 防止龋齿病, 碘含量过低引起甲状腺肿大, 但适量的碘不仅防治一些疾病, 还可有利于人的智力开发等; 故饮用水中规定 F^- 的适宜浓度为 $0.5 \sim 1.0\text{mg/L}$, 碘含量不应少于 $1.0\mu\text{g/L}$ 。

第三, 使用有利无弊。生活饮用水中如硬度的变化易引起胃肠功能暂时性紊乱, 硬度过高会在配水系统中形成水垢; 含铁过高不仅使水有异味, 还会使衣服、器皿生成黄褐色锈斑等等。因此对饮用水中的硬度、铁含量都做了规定。

③ 同时重要的是生活饮用水中不应含有各种病原细菌、病毒和寄生虫卵, 使流行病学上安全可靠。我国饮用水中规定细菌总数不超过 100 个/ ml , 大肠菌群不超过 3 个/ L , 游离

性余氯不应低于 0.3mg/L (出厂水) 等。

1.3.2.2 工业用水水质要求

工业种类繁多, 对其用水要求也不尽相同, 但它们共同点是水质必须保证产品质量, 保障生产正常运行。工业用水除饮用水外, 主要有生产技术用水、锅炉用水和冷却水。各种工业用水往往由行业自身做出规定, 例如: 纺织、人造纤维、造纸和染色用水对水色度要求分别为 10~12 度、15 度、15~30 度和 5 度; 纺织、人造纤维和鞣革用水对水中铁含量均要求为 0.2mg/L; 高压锅炉 (5~12.5MPa) 用水要求水中硬度和溶解氧(DO)分别为 1.8 mg/L (以 CaCO_3 计) 和 0.0mg/L; 半导体集成电路用水需要高纯水等。有关工业用水水质要求见附录 5。

1.3.2.3 农业用水与渔业用水水质要求

农业用水约占地球用水的 70%, 主要是灌溉用水, 要求在农田灌溉后, 人不因食用其灌溉的农作物而对身体产生不良影响。水的含盐量过高, 还会导致土壤盐碱化。因此我国规定, 对非盐碱土农田的灌溉用水总含盐量不得超过 1500mg/L。

渔业用水除保证鱼类的正常生存、繁殖外, 还要防止因水中有毒有害物质通过食物链在鱼体内的积累、转化引起鱼类死亡或食用有毒、有害水产品对人类自身造成的健康损害。

有关农业用水和渔业用水水质标准见附录 9、附录 10。

1.3.2.4 水体污染控制指标

污浊的水已成为世界上最大的杀手, 据报道每天至少有 25000 人因饮用了污染的水而死亡, 仅印度就有近千人。被污染的水中可能含有生活污水、重金属、油类、碳氢化物、垃圾渗滤物、化学去污剂、动物有机物、灰尘以及其他有害成分, 例如佛罗里达州一半以上的水污染以及在河流和沼泽中发现的近 85% 的重金属被认为来自该州城市街道的地表径流。前苏联的伏尔加河沿岸的工业废水是伏尔加格勒河段平均流量的 10%, 其中 3/4 的废水未经处理。在监测的 78 条中国河流中, 有 54 条被未经处理的污水和工业废物严重污染; 马来西亚的主要河流受到了来自棕榈油和橡胶生产过程以及生活污水和大量工农业废物的污染, 据说其中 40 多条河流从生物学角度均已经死亡等等。世界淡水形势严峻, 只有把预防污染放在首位。

地球是一个水的行星, 它的 70% 表面被水覆盖着, 但只有 7% 是淡水, 且大多数冻结在极地或位于不可触及的地下。据统计, 有 80 个国家的约 20 亿人缺水, 因此, 对江河、湖泊、海洋等地面水体污染控制, 保护世界淡水质量是当前一个相当紧迫的问题。其中水体污染控制标准就是为保护天然水体免受污染, 为饮用水、工农业用水、渔业用水等提供优质合格水资源的重要限制举措。

我国颁布的《地面水环境质量标准》和《污水综合排放标准》就是为保护水域水质、控制污染物排放、保证受纳水体水质符合用水要求而制定的具体措施和法规。