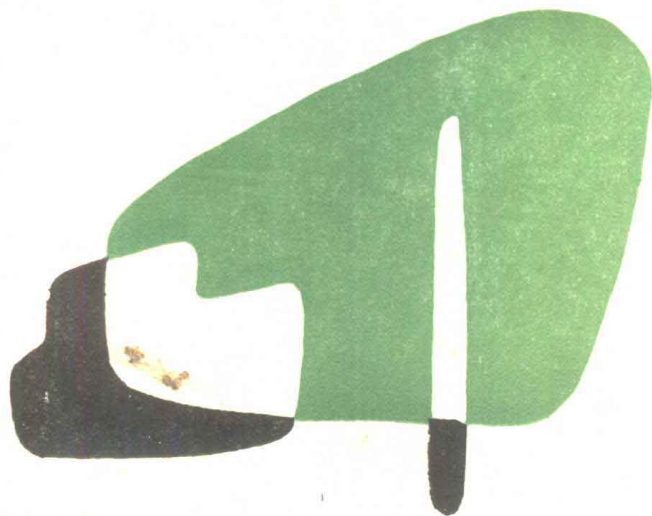


中等专业学校试用教材

水化学 与 微生物学

0645
0300

广州市市政建设中等专业学校
黑龙江省建筑工程学校 合编
天津市市政工程学校



中国建筑工业出版社

中等专业学校试用教材

水化学与微生物学

广州市市政建设中等专业学校
黑龙江省建筑工程学校
天津市市政工程学校 合编

中国建筑工业出版社

本书是中等专业学校给排水工程专业的技术基础教材。全书共13章,其中水化学部分7章,主要介绍水和水溶液、水质化学处理基本概念、电化学、胶体化学、水质分析概论、容量分析、比色分析;水微生物学部分6章,主要介绍细菌的形态和构造、细菌的生理特性、细菌的生长繁殖和细菌的遗传与变异、其它微生物、水的卫生细菌学、水体污染和废水生物处理中微生物的作用。此外,配合基础理论教学和给排水工程的实际需要,还选编了20个水化学实验和5个水微生物学实验。

本书注意了加强基础理论教学和学生能力的培养,故而尽量做到深入浅出、通俗易懂,使学生和其他读者易于自学。

本书可供从事给排水、环境保护、水质分析专业的学生和工程技术人员、管理干部、工人参考和自学。

中等专业学校试用教材
水化学与微生物学
广州市市政建设中等专业学校
黑龙江省建筑工程学校 合编
天津市市政工程学校

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 22½ 字数: 545 千字
1986年7月第一版 1988年12月第二次印刷
印数: 7,301—11,945 册 定价: 4.00 元
ISBN7-112-00529-9/G·80

(5029)

前 言

本书是根据城乡建设环境保护部教育局制定的《水化学与微生物学》教学大纲编写的。

本书初稿，于1983年秋季在部分学校试用过，此后曾作了两次讨论修改。第二稿，于1984年秋季又在全国城建类中专10多所学校试用。

在编写中，注意加强了基础理论教学和学生能力的培养，并尽量做到深入浅出，通俗易懂，使学生及其他读者易于自学。

本书编写分工：

广州市市政建设中等专业学校谭志琼编写水化学6~7章及实验1~20，并负责全书的主编工作；

黑龙江省建筑工程学校谭桂荣编写水化学1~3章；

天津市市政工程学校高旭荣编写水化学4~5章；

广州市市政工程设计研究院伍佩云和连信德同志编写水微生物学及实验21~25。

负责本书审稿工作的是：

南京建筑工程学院赵寿昌（水化学1~4章）；

衡阳铁路工程学校钟浪华（水化学5~7章及实验1~20）；

哈尔滨建筑工程学院杨文琴（水微生物学及实验21~25）。

参加本书定稿会的还有：北京城建学校杨大欣，南京城建职工中专刘碧霞、上海城建学校陆祖义，济南城建学校程鹏和王彭，抚顺城建学校于利，河南平顶山城建环保学校巴钧正和刘云木，广西建筑工程学校钱莹和黄平真等同志。此外，广州市市政建设中专学校伍玉燕老师，对本书的编写做了不少工作，在此一并表示感谢！

由于水平有限，实践经验不足，书中错误及不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1985年4月

目 录

水 化 学 部 分

第一章 水和水溶液.....1	第三节 憎液溶胶的胶团结构.....92
第一节 水的循环及水中杂质.....1	第四节 憎液溶胶的稳定性和聚沉.....95
第二节 水的结构和水的特性.....5	第五节 吸附作用.....98
第三节 溶液的浓度.....8	第六节 表面张力与润湿.....102
第四节 稀溶液的通性.....10	第七节 乳状液.....103
第二章 水质化学处理基本概念.....16	第八节 泡沫与浮选.....105
第一节 电解质溶液.....16	第五章 水质分析概论.....107
第二节 同离子效应和缓冲溶液.....25	第一节 水质分析概要.....107
第三节 盐类的水解.....32	第二节 定量分析的误差.....112
第四节 酸碱理论.....37	第三节 有效数字及计算规则.....116
第五节 碳酸平衡.....39	第四节 水的物理性质及其测定.....118
第六节 多相离子平衡.....43	第六章 容量分析法.....122
第七节 络合物.....51	第一节 容量分析法概要.....122
第八节 氧化还原反应.....57	第二节 中和滴定法.....128
第三章 电化学.....65	第三节 络合滴定法.....144
第一节 原电池和电极电位.....65	第四节 沉淀滴定法.....152
第二节 电解.....74	第五节 氧化还原滴定法.....154
第三节 金属腐蚀及其防止.....79	第七章 比色分析.....165
第四章 胶体化学.....86	第一节 比色分析法.....165
第一节 胶体的基本概念.....86	第二节 分光光度法.....173
第二节 胶体溶液的性质.....89	第三节 仪器分析简介.....178

水微生物学部分

概 述.....189	第二节 细菌的遗传与变异.....209
第八章 细菌的形态与结构.....192	第十一章 其它微生物.....212
第一节 细菌的大小与形态.....192	第一节 高等细菌.....212
第二节 细菌的结构.....193	第二节 真菌.....215
第九章 细菌的生理特性.....197	第三节 藻类.....217
第一节 细菌的营养.....197	第四节 原生动物.....219
第二节 酶的作用.....200	第五节 后生动物.....225
第三节 细菌的呼吸.....201	第六节 微生物之间的关系.....226
第四节 其它环境因素对细菌的影响.....205	第七节 水中微生物的控制方法.....228
第十章 细菌的生长繁殖和细菌的遗传与变异.....208	第十二章 水的卫生细菌学.....231
第一节 细菌的繁殖和生长曲线.....208	第一节 水中的细菌及其分布.....231
	第二节 水中的病原细菌.....231

第三节	大肠菌群和生活饮用水的 细菌标准	232
第四节	水的卫生细菌学检验	234
第五节	水中的病毒及其检验	236
第十三章	水体污染和废水生物处理 中微生物的作用	238

第一节	水体的污染、自净和指示生物	238
第二节	废水在微生物作用下的分解	240
第三节	不含氮有机物的分解	241
第四节	含氮有机物的分解	244
第五节	废水的好氧生物处理和 厌氧生物处理	248

实 验 部 分

水化学与微生物学实验须知	253
实验1 pH值的测定——电位法	259
实验2 胶体的制备与破坏	261
实验3 浑浊度的测定——光电比浊法	263
实验4 分析天平称量练习	266
实验5 悬浮性固体的测定	269
实验6 容量分析仪器的洗涤和 使用练习	271
实验7 盐酸标准溶液的配制与标定	274
实验8 水中碱度的测定	276
实验9 水中总酸度的测定	278
实验10 EDTA络合滴定法测定水中 总硬度	279
实验11 水中氯化物的测定	282
实验12 耗氧量的测定	284
实验13 溶解氧及生化需氧量的测定	290
实验14 氨氮的测定	294
实验15 亚硝酸盐氮的测定	298
实验16 硝酸盐氮的测定	300
实验17 铬的测定	303
实验18 水中总余氯的测定	305

实验19 水中铁的测定	308
实验20 挥发性酚的测定	312
实验21 显微镜的使用及微生物形态的 观察	315
实验22 培养基的制备与灭菌法	318
实验23 微生物的染色	322
实验24 微型动物的计数	325
实验25 水的细菌学检查	327
附录	338
1. 生活饮用水卫生标准	338
2. 电离常数	338
(1) 弱酸的电离常数	338
(2) 弱碱的电离常数	339
3. 溶度积常数	339
4. 络合物的稳定常数	340
5. 标准电极电位(298.15K)	341
6. 基准物质及其干燥温度	343
7. 常用酸碱的当量浓度表	343
8. 我国试剂等级的划分表	344
9. 常用试剂的分子量及当量表	344
10. 废水生物处理过程中常见的微生物	347

水 化 学 部 分

第一章 水 和 水 溶 液

水是地壳中分布最广的物质之一，也是人类环境的重要组成部分。地球上水的总量约为13.6亿立方公里，将这些水全部铺在地球表面上，厚度可达3000多米。海洋中的水占地壳总水量的97.2%，覆盖面积为地球总面积的70%以上。陆地上到处分布着江河、湖泊、沼泽，构成地面水，其水量约为23万立方公里，其中淡水有一半左右，占地壳总水量的万分之一。土壤、岩层及地下深层中含的水叫做地下水，总量约为840万立方公里。

在高山和南北极地区，积存巨量冰雪和冰川，它们竟占去地面水总量的四分之三。水还以蒸气和云的形式分布在大气中。动植物机体内饱含着水。细胞的原生质内含有80%的水。人的体重有65%为水分。植物体内水的含量占其自身重量的80%~95%左右。即使在无生命的矿物岩石结构中，也存在相当数量的结晶水。水在整个自然和人类社会中，发挥着不可估量的巨大作用，没有水就没有生命，更不会有今天的人类文明。

本章将结合给水工程需要，介绍水的循环、水质指标及其标准、水的特性及水溶液的通性方面的基本知识，为水质分析和水化学打下初步的理论基础。

第一节 水的循环及水中杂质

一、水的循环

水有气、液、固三种聚集状态，通常主要是以液态形式存在。地面水不断蒸发变成水蒸汽，水蒸汽凝聚成雨或雪回到地面，称为降水。降水分成两路流动，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，形成地下水层和水流，称为地下渗流。这两路水流，又相互交流转化，最后汇入海洋，构成一次大循环。大自然中的水川流不息、周而复始地运动，构成了水的自然循环，图1-1是水的自然循环示意。

自然循环的推动力是太阳的热能和地球的重力。研究水的自然循环及其规律的学科是水文学。

人类为了满足生活和生产的需要，要从各种天然水体中取用大量的水。人体的生理用水量为每日2.5升，全部的生活用水量每日需要数十升到数百升之多。生活水平越高，用水量就越大。所有的生

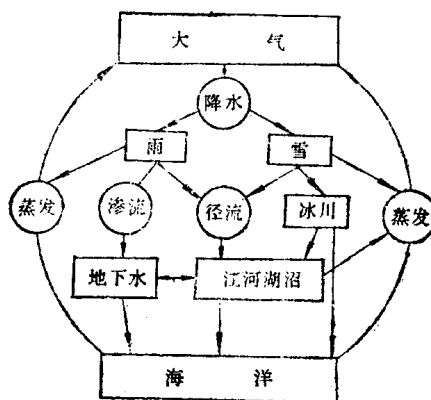


图 1-1 水的自然循环

各类产品的单位用水量

表 1-1

产 品 (T)	用水量(m ³)	产 品 (T)	用水量(m ³)	产 品 (T)	用水量(m ³)
铜 铁	300	炸 药	800	棉 纱	200
钢 板	70~75	汽车(辆)	40	苛 性 钠	100~150
白 铁 皮	50	电力(千瓦小时)	0.2	苏 打	50
铝	160	甜 菜 糖	100~200	乙 醇	200~500
煤 碳	1~5	纸 浆	200~500	丙 酮	360
水 泥	1~4	报 纸	280	醋 酸	400~1000
汽 油	12~20	合成橡胶	125~2800	肉类加工	8~35
航空汽油	40~50	粘 液 丝	1000~2400	啤 酒	10~20
化 肥	50~250	毛 织 品	150~350		
硫 酸	2~20	皮 革	50~125		

产部门没有一个不需要水。动力、纺织、食品、造纸、机械、化工、石油、冶金、采矿、医药等部门的用水量都很大，而且日益增长。各类产品的单位用水量可见表1-1。

生活用水和工业用水，在使用后就变成了生活污水和工业废水，经过处理后，最终又流入天然水体。这样，水在人类社会中也构成了一个局部的循环体系，称为水的社会循环。

自然循环的水量只占地壳总水量的0.031%，而其中径流和渗流的水只占0.003%。而社会循环取用的水量只占径流和渗流水量的2%~3%，这个数量只占地壳总水量的百万分之一。然而，却表现出人与自然在水量和水质方面存在着巨大的矛盾。水体环境保护和给水排水工程的任务，就是解决水在社会循环中的水量和水质方面的矛盾，使水的社会循环满足人类的生活和生产需要。

二、水质指标及其标准

天然水在循环中混入了各种杂质，水和其中杂质所表现出来的共同的综合特性，称为水质性质，简称水质。各种水质因含杂质种类和含量不同，形成了不同的水质指标。所谓水质指标系指水中杂质的具体衡量尺度。各种水质指标，表示出水中杂质的种类和数量，由此可以判断水质优劣以及是否满足要求。水质指标可分为物理指标、化学指标、毒理学指标、放射性指标和微生物学指标。

一般情况下，水质指标包含有水质标准的涵义，但严格地讲，水质指标与水质标准是有区别的。水质标准是对一些水质指标作出的定量规范。生活饮用水的水质标准详见附录1。

(一) 天然水中杂质

天然水中杂质按其颗粒大小分为三类，颗粒最大的称为悬浊物；其次是胶体；最小的是离子和分子，也叫溶解物质。

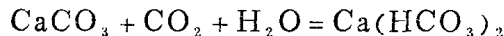
悬浊物主要是泥砂和腐植质。泥砂逐渐下降，腐植质不断上升，造成天然水体的浑浊现象。

天然水体中的胶体物质分两类：一类是矿物质胶体，有 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和硅酸盐；另一类是有机腐植质。湖泊的水含有机腐植质较多，由于微生物的作用常使水呈现黄绿色或褐色。

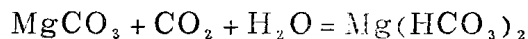
天然水中的溶解物质，大都是离子和一些溶解气体。常见的离子有 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HSiO_3^- 等，其次是 NH_4^+ 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 F^- 、 NO_3^- 、 CO_3^{2-} 。

等，再其次是 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Al^{3+} 、 HS^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 I^- 、 H_2PO_4^- 等。

水中 Ca^{2+} 含量常居于阳离子中的第一位，它主要来自石灰岩地层的溶解。 CaCO_3 在水中的溶解度虽然很小，但当水中 CO_2 的浓度增大时， CaCO_3 较易溶解转化成可溶性的重碳酸钙，其反应如下：



水中 Mg^{2+} 含量仅次于 Ca^{2+} ， Mg^{2+} 主要来源于岩层中白云石被含有 CO_2 的水溶解，其反应如下：



天然水的总硬度系指 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Al^{3+} 等阳离子的含量。由于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量较多，其它的阳离子含量较少，因此常把 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度总和作为天然水总硬度的量度。

HCO_3^- 是天然水中主要的阴离子，它是天然水总碱度的组成部分之一。

天然水中常见的溶解气体有 O_2 、 CO_2 、 H_2S 、 SO_2 、 NH_3 等。

（二）生活污水和工业废水中的杂质

生活污水中含有各种生活废物，如粪便、垃圾、病原菌等各种有机物和微生物。各种工业废水中含有各种生产废料、废渣及部分原料半成品、成品、副产品等。

氰化物、硫化物、砷化物、重金属离子以及有机农药等，都是有毒物质，有些则是致癌物质。这些有毒物质在水体中虽然浓度不大，但却严重地危害人类的健康。

废水中的有毒和有害物质，若不加处理就排放掉，不仅是一种浪费，更重要的是会造成社会公害，现已被人们所认识，必须认真对待。

（三）给水工程的任务

天然水体是人类宝贵的自然资源。随着人民生活水平的不断提高和工业生产的不断发展，而产生的生活污水和工业废水的排放量也不断增加，对天然水体也造成了一定的污染，甚至污染还十分严重。给水工程的任务，就是排除污染，为人们的生活和生产提供合乎标准的用水。

生活饮用水必须符合国家规定的水质标准。水质标准的确定原则是：

1. 水中不得含有病原菌和寄生虫卵。
2. 水中有毒或有害物质的含量不得超过对人体产生不良影响的限度；水中应含有人体必需成分，即水中各种化学成分不得对人体产生不良的作用，人体必须的成分不得缺少。
3. 水中的物理状态良好，即透明、无色、无臭味等。

工业用水对水质的要求是复杂多样的。根据使用的目的和产品要求，工业用水可分为原料用水、产品处理用水、生产过程用水、动力用水、冷却用水、高纯度用水等。各类用水的标准是不同的。总的说来，应满足生产条件需要、保证产品质量、不会造成生产故障、不致损害技术设备等。各种工艺产品所要求的水质标准如表1-2所示。

生活饮用水和各种工业用水对水质指标的要求，一般常在几项到几十项之间。天然水能够直接满足生产需要是很少的。可见，天然水与生活用水、工业用水的水质之间存在很大差距，为满足工业生产和生活饮用水对水质的不同要求，必须采用一定的处理方法去掉水中所含杂质。这个过程叫做水的净化。

（四）水的净化

工艺用水水质要求

表 1-2

用水工业	浑油 度 (度)	色 度 (度)	总硬度 (度)	总碱度 (毫克/升)	pH	总含盐量 (毫克/升)	铁 Fe (毫克/升)	锰 Mn (毫克/升)	硅 酸 SiO ₂ (毫克/升)	氯化物 Cl (毫克/升)	KMnO ₄ 耗 氧 量 (毫克/升)
制 糖	5	10	5	100	6~7	—	0.1	—	—	20	10
造纸(一般纸)	25	15	5	100	7	200	0.2	0.1	50	75	20
纺 织	5	20	2	200	—	400	0.25	0.25	—	100	—
鞣 革	20	10~100	3~7.5	200	6~8	—	0.1~0.2	0.1~0.2	—	10	—
人造纤维	0	15	2	—	7~7.5	—	0.2	—	—	—	6
合成橡胶	2	—	1	—	6.5~7.5	100	0.05	—	—	20	—
合成染料	0.5	0	3	—	7~7.5	150	0.05	—	—	25	—

按净化目的不同,水的净化可分为去除水中不溶解性杂质和去除微生物、改变水中溶解物的含量等两种方法。前者常常采用混凝、澄清、过滤和消毒等步骤,以达到去除不溶性杂质的目的。后者常采用离子交换剂、反渗透和电渗析法改变水中溶解物含量,以达到除盐的目的。

混凝是加各种混凝药剂于水中,使水中的悬浮杂质、胶体物质和微生物凝聚成为大颗粒沉淀下来,再经澄清、过滤成清水。常用的混凝药剂有明矾、硫酸铁、氯化铁、硫酸铝等。清水在供人类饮用之前还必须进行消毒,以杀灭在混凝过滤中残留下来的全部细菌和微生物。消毒法可分为物理和化学法两类。加热、紫外线照射、超声波等处理属于物理处理法;而加入重金属离子、臭氧氧化、氯化等则属于化学处理法。氯化法操作简单、成本低、效果良好,因此在供水系统中广为利用。

各种工业用水对水质的要求差异很大。如动力锅炉要求水中不得含有悬浮杂质、溶解氧和二氧化碳,且硬度要很低。高压锅炉除上述要求外,还要求水中含盐量尽可能很少。Ca²⁺、Mg²⁺的存在会使鞣革变坏、纺织品粗糙且难以染色。为满足各种工业对水质的不同要求,对水中溶解性杂质可采取不同的处理方法。下面将重点讨论离子交换法除盐的基本原理。

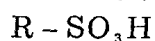
离子交换法除盐是将水中有害于生产的阳离子或阴离子换成无害于水质的 H⁺ 或 OH⁻。

具有离子交换能力的物质叫做离子交换剂。能与阳离子交换的离子交换剂叫做阳离子交换剂。能与阴离子交换的离子交换剂叫做阴离子交换剂。离子交换剂按其组成可分为无机和有机离子交换剂。

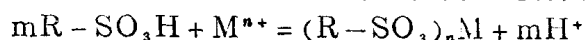
天然海绿砂,人造浮石等属于无机离子交换剂,它的缺点是交换能力差、而且只能交换阳离子,现已被有机离子交换剂所代替。

有机离子交换树脂具有不溶解、耐热、机械强度高、交换能力强等优点。

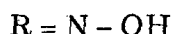
有机离子交换树脂按其用途不同,可制成液态的、薄膜的、纤维状的、纸状的、颗粒状的、块状的等。常用的是直径为0.3~1.2mm的黄褐色的、颗粒状的聚苯乙烯磺酸阳离子交换树脂。阳离子交换树脂呈酸性,其通式为:



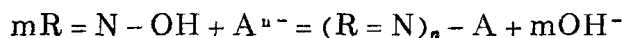
阳离子交换树脂在交换中释放出 H⁺, 而与水中的阳离子进行交换, 反应式为:



阴离子交换树脂呈碱性，其通式为：



阴离子交换树脂在交换中释放出 OH^- ，而与水中的阴离子进行交换，反应式为：



经过阴阳离子交换树脂处理后的水，只剩下 H^+ 和 OH^- ，这两种离子结合成难以电离的水，从而达到消除盐类的目的。

对含盐较高的海水、苦咸水等，采用离子交换树脂除盐时，因含盐多离子交换树脂再生次数增多、老化速度加快，故除盐效果不佳，而采用反渗透法和电渗析法除盐较为适宜。

第二节 水的结构和水的特性

一、水的结构

在讨论水的结构和特性时，让我们先回顾日常生活中存在的事实。当温度足够低的时候，许多气体都可以凝聚成液体，甚至凝结成固体。是什么作用使物质的聚集状态发生改变的呢？近代结构理论告诉我们，这种作用叫做分子间力或范德华力。分子间力不属于化学键，它是分子间的一种吸引作用。由于分子间力作用方式不同，分子间力分为取向力、诱导力和色散力三种类型。

当极性分子和极性分子接近时，由于极性分子具有明显正负极，极性分子间采取了异极取向状态，这种异极取向作用产生的分子间力叫做取向力。

分子极性越强，分子间距离越小，取向力就越显著。

当极性分子与非极性分子接近时，极性分子的诱导作用使非极性分子重合的正负电荷重心发生了变形，产生诱导偶极。而后极性分子与非极性分子采取异极相吸状态，由此产生的分子间力叫做诱导力。

极性分子极性越强，非极性分子变形性越大，分子间距离越小，诱导力越显著。

当非极性分子与非极性分子接近时，由于分子中原子和核外电子的运动，使非极性分子的正负电荷重心相对发生了位移，出现了瞬时偶极，而后采取异极相吸状态，这种作用产生的分子间力，因与非极性分子间所产生的分子间力的计算公式和光谱学中的光的色散公式类似，故称为色散力。

色散力存在于一切分子间。色散力的大小与分子半径的大小、分子变形性的强弱、分子间距离的大小有关。分子半径越大，即分子量越高、分子变形性越强、分子间距离越小，色散力越显著。

综上所述，在极性分子间存在取向、诱导和色散作用，在极性分子和非极性分子间存在诱导和色散作用，在非极性分子间只存在色散作用。

分子间力是影响物质物理性质的重要因素。物质的颜色、聚集状态、熔沸点、溶解度、硬度等，都与分子间力有直接关系。当然，物质的物理性质还与分子间存在的其它作用有关。

下面我们先看一下卤化氢的熔沸点实验数据：

	HF	HCl	HBr	HI
沸点(°C)	19.9	-85.0	-66.7	-35.4
熔点(°C)	-83.1	-114.8	-88.5	-50.0

气体可以液化为液体，液体又可以凝结为固体，主要是依靠分子间力作用而达到的。分子间的吸引作用越强，分子则越容易液化或凝固；分子间的吸引作用越强，物质越不容易熔化或气化，表现出物质的沸点和熔点越高。

然而，在卤化氢的熔沸点递变中，明显地看出，从HCl至HI符合色散力递增、熔沸点亦随之递增的规律。但分子量小的HF，却在同族中表现出熔沸点最高的反常现象。在研究氧族和氮族的氢化物中，也发现了同样的规律。只有碳族的氢化物的熔沸点的高低，符合分子间力的递变规律，这是因为在HF、H₂O、NH₃的分子中，除了前面讲过的分子间力外，还有一种新的作用——氢键。图1-2，为IV A—VII A氢化物沸点变化示意图。

元素周期表中，只有电负性较大的F、O、N三种元素的原子才能形成氢键。

当氢原子和电负性较大的X原子以共价键结合形成分子后，由于共用电子对强烈地偏向X原子，使氢核几乎裸露出来，这种氢核由于体积小、又无电子层，不易被其它原子的电子云所排斥，所以它能吸引一个电负性大的Y原子中的独立电子对而形成氢键。图1-3，为两个水分子间的氢键示意图。

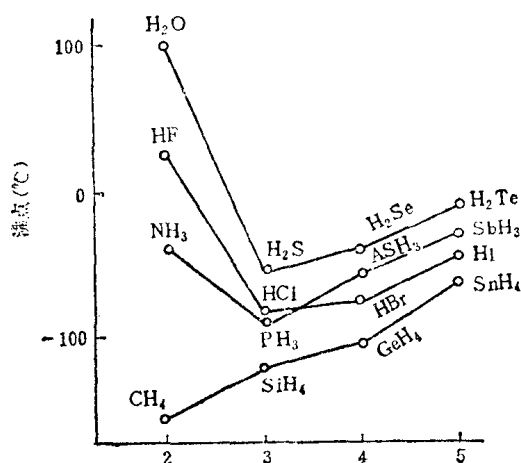


图 1-2 IV A—VII A氢化物沸点变化

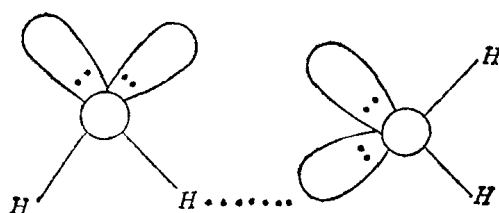


图 1-3 水分子间的氢键示意图

氢键亦可用X—H.....Y表示。X与Y可以是同种元素的原子，也可以是不同元素的原子。

氢键具有饱和性和方向性，这一点与共价键类似。在水分子间，H原子只能和一个O原子结合形成O—H.....O氢键。由于氢原子很小，在第二个氧原子靠近它时，已被结合成氢键的氧原子排斥开了，这就是氢键的饱和性。此外，当氧原子靠近O—H中氢原子形成氢键时，尽量使之保持O—H.....O呈直线型排斥力最小，才能吸引得牢固，这就是氢键的方向性。但是，氢键本质上属于分子间力的范围，它的作用强度比分子间力稍高。

液态水中有(H₂O)₂、(H₂O)₃等缔合分子，就是靠氢键把H₂O分子结合在一起形成的。简单的水分子和复杂的水分子间存有下列平衡关系：



这种由简单的分子结合成比较复杂的分子，而物质的化学性质不发生改变的现象叫做分子的缔合。这种缔合随温度而改变。水在沸腾时，由于氢键被破坏，大多数为单个水分子，只有极少数的二分子体的水，即(H₂O)₂。

液态水中几乎都是缔合的二分子体(H₂O)₂和三分子体(H₂O)₃的水。水的很多反常现象，都与水中含有氢键有关。

水分子是通过共价氢氧键形成的。由于结构不对称，使水分子具有强极性，氢氧键的键能很高，水分子间又存在氢键，水的这种特殊结构决定了水的异常特性。

二、水的特性

(一) 热稳定性高

由于水分子的氢氧键能高，要破坏氢氧键需要很高的能量。实验证明，将水加热至 1000°C 左右，仅有 0.0008% 的水分子分解成氢和氧。水的这一重要性质，被广泛的用于化工生产和民用取暖方面。工业上常用锅炉把水加热成高温、高压的蒸气来传送热量。水作为一种廉价的热交换介质，是其它任何物质都不能与之比拟的。

(二) 温度——体积效应

热胀冷缩是一般物质的变化规律。然而，水在 $0^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 间不服从这一规律，而是温度升高，其体积反而缩小，到 4°C 时，体积最小、密度最大，达到 $1\text{克}/\text{厘米}^3$ 。超过或低于 $0^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 的温度范围，体积都会膨胀。在 0°C 时，水的密度为 $0.99\text{克}/\text{厘米}^3$ ，冰的密度为 $0.916\text{克}/\text{厘米}^3$ ，这与一般物质在凝固时，体积缩小的规律相反，这种现象叫做水的温度——体积效应。

这种现象的发生，是因为水分子间含有氢键的缘故。氢键使水在不同温度下形成不同的缔合分子。在 $0^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 间，二分子体的缔合分子水占绝对优势，此时水分子排列整齐、靠拢紧密，此现象在温度接近及达到 4°C 时更加突出，故 4°C 时，水的密度最大。进一步加热，使温度超过 4°C ，缔合的二分子体水逐渐破坏，简单的一分子体水占优势，且分子热运动增强，扩大了分子间的距离，使水的体积增大、密度变小。水在结冰时，绝大多数二分子体水和一分子体水转化为三分子体的巨大缔合分子——冰，三分子体水结构比较疏松、中间有很大的孔隙，所以水结冰后体积膨胀、密度减小。图1-4，是二分子体、三分子体水结构示意图。

水的密度在 4°C 时达到最大值，这种奇特变化方式对寒冷气候地区具有十分重要的意义。在气温急剧下降的深秋夜晚，当温度达到 4°C 时，由于密度最大，江、河、湖、海面较重的水层向下沉降，与下部水层更换，这种交换过程使得溶解在水中的氧与其它营养物质得以在整个水域中分布均匀，交替变更的结果，使江河湖海的水趋于一种稳定状态。然后，当水面上的温度降低至 0°C 以下，上面的水开始结冰，水面被冰封住，而下面的水均保持在 4°C 左右，这样，水生动植物才得以安全过冬。在海洋里，终年进行类似过程的更换，这种更换是决定洋流分布的主要因素。不论在世界上什么地区，洋面下约1000米处的海水温度，差不多都是在 $0^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 之间。

(三) 热容量最大

水在所有液体和固体中比热居首位，达到 $1\text{卡}/\text{克}\cdot\text{度}$ 。冰的溶解热和水的汽化热也很高。水的热容量大是与水分子为强极性分子、含有氢键有关。氢键使水分子间形成缔合分子，强极性分子间的取向作用强烈，分子间力增大。在加热时，水分子除了要消耗一定能量克服较强的分子间力外，还要消耗额外的能量来破坏氢键，即破坏缔合分子。因此，

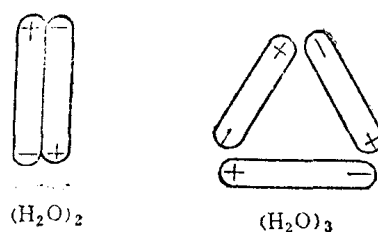


图 1-4 二分子体、三分子体水结构示意图

使水升高一度所需要的热量比不含有氢键的其它液体要高得多。

水的这种作用对调节气温起着巨大作用。如沿海一带，白天虽然受到太阳的照射，但因水的比热特别大，以及水在气化时不断地吸热，当海水温度升高时，要吸收大量的热。因此，气温不会升得太高，而到了晚上，海水温度降低，又要放出大量的热，使气温也不会降得太低，这就是沿海地区早晚温差小的原因。

（四）表面性质突出

水在常温下的液体中，除汞之外，具有最大的表面张力，达到72.75达因/厘米，而其它液体的表面张力，大多数在20~50达因/厘米范围内。表面张力亦称应力，可以简单地把表面张力定义为使液体表面收缩的力。溅出的水滴、禾叶上的露珠之所以呈圆球形，就是因为是在表面张力的作用下，液体有尽可能使其表面收缩得最小的趋势，球体的表面积同其体积的比值是最小的。

水的表面张力大，是由水分子的极性和水分子间存在氢键决定的。水分子极性大、分子间含有氢键，使水分子间相互吸引的作用增强，因而具有很高的内聚力。在内聚力作用下，内部水分子强烈趋于把表面水分子拉向内部，从而造成很大的表面张力。表面张力随温度升高而降低。

水的表面张力大，由此产生的毛细浸润、吸附等物理现象，也十分显著。毛细现象在生命过程中具有重要意义，植物的根毛从土壤中吸收水分，土壤中的水分能上升到地表，都是靠毛细作用完成的。日常生活中，吸墨纸、粉笔能吸起墨水、打火机中汽油沿灯芯上升，都是毛细现象的实际应用。

（五）溶解能力强

由于水的溶解能力极强，使水成为一种良好的溶剂，广泛用于化工、医药、卫生、食品加工、工农业生产等方面。

水的溶解能力强，也是由水的特殊结构决定的。在讨论两种液体相互溶解或固体溶解于液体时，曾用“相似相溶”的原则解释溶解度，这是因为具有相似结构及分子间力的类型、大小差不多相同的液体，可按任意比例彼此相溶。大多数无机物质可溶解于水中，是因为大多数无机物质为极性分子。酒精是有机物质，却能以任意比例溶于水，是因为酒精分子中含有羟基官能团且分子间含有氢键，分子间的作用力与水相当，这样两种分子相混时，好象一种物质分子。相反，戊烷不溶于水，却能以任意比例溶于己烷之中，这是因为戊烷和己烷是非极性分子，是由大小近乎相等的色散力维持在一起的。

水的溶解特性，对于生命体的活动有特殊的意义。

第三节 溶液的浓度

溶液的浓度在很大程度上取决于溶质和溶剂的相对含量。为此缘故，在涉及溶液性质的定量计算中必须指明浓度。所谓溶液的浓度系指一定量的溶液或溶剂中所含溶质的量。百分比浓度、摩尔浓度、当量浓度在化学课本中已经讲过，为适应工程计算和水的物理性质方面的需要，将讨论下面两种浓度。

一、重量摩尔浓度

重量摩尔浓度，简称重摩尔浓度。用符号 m 表示。重摩尔浓度是用1000克溶剂中所含溶

质的摩尔数来表示。

公式

$$m = \frac{n_{\text{质}}}{W_{\text{剂(千克)}}}$$

重摩尔浓度和体积摩尔浓度比较如下：

1. 重摩尔浓度用 m 表示，体积摩尔浓度用 M 表示。
2. 从定义上看，重摩尔浓度指1千克溶剂中所含溶质的摩尔数；体积摩尔浓度指1升溶液中所含溶质的摩尔数。
3. 从性质上看，重摩尔浓度属于重量浓度，不随温度改变；体积摩尔浓度则属于体积浓度，随温度而改变。
4. 从应用上看，重摩尔浓度常用于工程中溶液通性的计算；体积摩尔浓度常用于实验室溶液的配制。

在极稀水溶液的计算中，常把二者等同起来，即

$$m \approx M$$

二、摩尔分数（摩尔分数浓度）

溶液的浓度用溶质的摩尔数占全部溶液摩尔数的分数来表示时，叫做摩尔分数或摩尔分数浓度。

如80克NaOH溶于180克水中，欲求NaOH溶液的摩尔分数浓度，则根据定义，设溶剂的摩尔分数为 X_1 ，溶质的摩尔分数为 X_2 。设 n_1 、 n_2 分别为溶剂及溶质的摩尔数。

$$n_2 = \frac{W}{MG} = \frac{80}{40} = 2$$

$$n_1 = \frac{W}{MG} = \frac{180}{18} = 10$$

则NaOH溶液的摩尔分数为：

$$X_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = \frac{2}{10 + 2} = \frac{1}{6}$$

其中

$$X_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} = \frac{5}{6}$$

有

$$X_1 + X_2 = 1$$

摩尔分数的优点为可使计算过程简便，已知溶质的摩尔分数便知溶剂的摩尔分数，而且这种浓度不随温度而改变。在讨论溶液浓度和溶液物理性质之间的关系或溶质和溶剂的摩尔数之间的关系时，常采用摩尔分数浓度单位。

各种溶液的浓度单位，可以密度为桥梁而相互换算。

【例题】 浓度为98%的 H_2SO_4 ，其密度为1.84，求此 H_2SO_4 的

- (1) 体积摩尔浓度 M ；
- (2) 当量浓度 N ；
- (3) 重量摩尔浓度 m ；
- (4) 摩尔分数浓度。

【解】

$$(1) \quad M = \frac{d \times A\% \times 1000}{MG} = \frac{1.84 \times 98\% \times 1000}{98} = 18.4 (M)$$

(2)

$$N = \frac{d \times A\% \times 1000}{E} = \frac{1.84 \times 98\% \times 1000}{49} = 36.8 (N)$$

或

$$N = 2M = 18.4 \times 2 = 36.8 (N)$$

98%的浓 H_2SO_4 即: 100克 H_2SO_4 溶液中有98克 H_2SO_4 , 有2克水。设1000克水中含有 H_2SO_4 的重量为W克。

则 (3) $2:98 = 1000:X$

$$W = \frac{98 \times 1000}{2} = 49000$$

$$n = \frac{W}{MG} = \frac{49000}{98} = 500 (mol)$$

$$m = \frac{n}{W_{\text{剂(千克)}}} = \frac{500}{1} = 500 (m)$$

(4) 设 H_2SO_4 溶液的摩尔分数浓度为 X_2 。

$$n_2 = \frac{W}{MG} = \frac{98}{98} = 1 (mol)$$

$$n_1 = \frac{W}{MG} = \frac{2}{18} = 0.11 (mol)$$

$$X_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = \frac{1}{0.11 + 1} = \frac{1}{1.11}$$

第四节 稀溶液的通性

水是一种良好的溶剂。由于溶于水中的溶质不同, 往往表现出各自不同的性质。但是, 所有的水溶液却表现出一些共同的性质。这些通性有溶液的蒸气压下降、沸点升高、凝固点降低和溶液的渗透压等。实验证明, 溶液的通性主要取决于所含溶质的粒子数, 而与溶质的本性无关, 故称为溶液的依数性。本节将讨论非电解质水溶液的依数性。

一、溶液蒸气压下降

如果把一杯液体置于密闭的容器中, 首先, 液面上那些能量较大的分子就会克服液体分子的引力从表面逸出。蒸发出来的分子在液面上的空间向四面八方运动时, 其中一部分可能撞到液面, 为液体分子吸引而重新凝结。由于液体在一定温度的蒸发速度是恒定的, 开始时, 液面空间尚无蒸气分子, 凝结速度为零。随着时间的过去, 蒸气分子的浓度增加, 凝结的速度也增加, 最后, 凝结的速度和蒸发的速度达到相等, 液体和它的蒸气就处于平衡状态。从表面上看, 蒸气分子的浓度不再增加, 液体的量也不再减少, 实际上是单位时间内从气体回到液体的分子数等于从液体进入气体的分子数。我们把一定温度下, 液体和它的蒸气处于平衡状态时, 蒸气所具有的压力叫做饱和蒸气压, 简称蒸气压。

由实验测出, 在液体中溶解任何一种难挥发的物质, 液体的蒸气压便下降。因此, 在同一温度下, 难挥发物质溶液的蒸气压总是低于纯溶剂的蒸气压。在这里, 所谓溶液的蒸气压, 实际是指溶液中溶剂的蒸气压。同一温度下, 纯溶剂蒸气压和溶液蒸气压的差叫做溶液的蒸气压下降。

溶液的蒸气压比纯溶剂低的原因是由于溶剂中溶解了难挥发的溶质后, 溶剂的一部分

表面或多或少地被溶质的粒子所占据, 单位时间内从溶液中蒸发出的溶剂分子数比从纯溶剂中蒸发出的分子数少。因此, 在达到平衡时, 难挥发物质的溶液的蒸气压低于纯溶剂的蒸气压。显然, 溶液的浓度越大, 溶液的蒸气压下降越多。

某些固体物质, 如 NaOH 、 CaCl_2 、 P_2O_5 等, 在空气中易吸收水分而潮解, 这是由溶液蒸气压下降引起的, 因为这些固体表面吸收水分后成为溶液, 它的蒸气压比空气中水蒸气分压小, 结果空气中的水蒸气不断地凝结进入溶液, 使这些物质继续潮解。由于这种性质, 这些易潮解物质常用作干燥剂。

1887年拉乌尔根据许多难挥发非电解质溶液所得出的实验结果, 发现在一定温度下, 稀溶液中溶剂的蒸气压(p_1)与溶剂的摩尔分数(x_1)成正比, 比例常数就是纯溶剂的蒸气压(p_1^0)。

$$p_1 = p_1^0 x_1$$

如用 Δp 代表溶液的蒸气压下降, 则

$$\Delta p = p_1^0 - p_1$$

将 $p_1 = p_1^0 x_1$ 代入 $\Delta p = p_1^0 - p_1$ 中, 得

$$\Delta p = p_1^0 - p_1^0 x_1 = p_1^0 (1 - x_1)$$

由于

$$x_1 + x_2 = 1 \quad x_2 = 1 - x_1$$

因此

$$\Delta p = p_1^0 x_2$$

这个公式说明, 在一定温度下, 稀溶液的蒸气压下降和溶质的摩尔分数成正比。这个结论通常叫做拉乌尔定律。

拉乌尔定律从理论上进一步证明了溶液的蒸气压下降只与溶液的浓度有关, 而与溶质的本性无关。

【例题】 23°C时, 水的蒸气压为21.00mmHg, 若将360克葡萄糖 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 溶于1440克水中, 测得溶液的蒸气压降低0.50mmHg。求 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 的分子量。

【解】

$$\Delta p = p_1^0 x_2$$

得

$$x_2 = \frac{\Delta p}{p_1^0} = \frac{0.50}{21.00} = 0.024$$

因为

$$x_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = \frac{\frac{360}{\text{MG}}}{\frac{1440}{18} + \frac{360}{\text{MG}}} = 0.024$$

可求出葡萄糖的摩尔质量 $\text{MG} \approx 180$

所以

$$M \approx 180$$

二、溶液的沸点升高

温度升高, 液体的蒸气压增大, 这是因为温度升高时, 液体分子间的引力减小, 整个液体分子的平均动能增大, 单位时间内从液体表面逸出的分子数增多, 因此达到平衡时蒸气压增大。

若在敞口容器加热液体时, 由于温度升高液体的蒸气压不断增大, 当溶液产生的蒸气压等于大气压强时则液体沸腾。液体沸腾时的温度叫沸点。1大气压下, 纯水的沸点是100°C。

固体表面分子也存在蒸发问题, 如果在密封的容器内, 固体和它的蒸气之间也能建立固体和气体平衡。冰在0°C时的蒸气压为4.58mmHg, 而在-25°C时, 只有0.476mmHg,