

编著 阮国洪

水的科学与健康

SHUIDE KEXUE YU JIANKANG



学出版社

本书的研究和出版由福建省高校产学研合作科技重大项目“高偏硅酸天然矿泉水生物学效应的应用研究”资助，项目编号：2012Y4004。

编著 阮国洪

水的科学与健康

SHUIDE KEXUE YU JIANKANG

复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

水的科学与健康/阮国洪编著. —上海:复旦大学出版社,2012.6
ISBN 978-7-309-08798-7

I. 水… II. 阮… III. 水-基本知识 IV. P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 055292 号

水的科学与健康

阮国洪 编著

责任编辑/贺琦

复旦大学出版社有限公司出版发行

上海市国权路 579 号 邮编:200433

网址:fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

门市零售:86-21-65642857 团体订购:86-21-65118853

外埠邮购:86-21-65109143

上海华教印务有限公司

开本 890 × 1240 1/32 印张 8.875 字数 226 千

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

印数 1—4 100

ISBN 978-7-309-08798-7/P · 008

定价:26.00 元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社有限公司发行部调换。

版权所有 侵权必究

前 言

本书立足于科学基础,全面介绍水的相关科学知识及水与健康的关系,唤起人们对水与健康重要性的认识,加深读者对水与健康的重要性的理解。本书适合各行各业的人士阅读,也可以作为大学相关专业的本科生教材、选修课教材和与水有关的企业、学校等机构的培训教材。

虽然编者从事水与健康关系的研究已有 20 多年,本书也历经 5 年编著,反复推敲,几易其稿,但是由于编者水平有限,本书难免有不妥之处,敬请同行专家、读者批评指正。

阮国洪

2012 年 5 月

绪 论

茫茫宇宙,有水才有生命;朗朗乾坤,有水才有人类。在地球表面,水占地球总面积约 71%,在人体内,水约占体重 70%。水直接关系到社会、经济发展和人类的生存及健康,故水研究领域十分活跃。从近代生物化学、生理学、量子化学、结构物理学及生物进化等科学领域的理论及其研究成果证明——水中矿物质对人体生命与生物非常重要。

“饮食”包含了两重意思:一为饮,二为食。古人讲:“民以食为天,食以饮为先。”医圣李时珍的《本草纲目》就把“水”列为各篇之首。

人体由水、蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素、矿物质六大类营养素组成。其中水所占的比重约为人体体重的 70%,人的生命是由体内无数水分托起的,可以说人是水做的。生命的新陈代谢、系统平衡、消化吸收、血液循环、营养输送、体温调节等每一项生理活动都离不开水,生命的每一个细胞都是靠水支撑起来的。如果人体的水分损失 20%,就无法进行氧化、还原、分解、合成等各项生理活动。如果人还能享用水,说明生命还在继续,如果连水都不能喝了,那生命即将结束。

过去营养学家主要研究的是人体内 30%的固态物质(蛋白质、碳水化合物、脂肪、矿物质和维生素),忽视对占人体 70%水物质的研究。国内的营养学家基本不谈水,认为水是最常见普通的东西,常有意或无意忽视和轻视,以至于作为营养素之首的水的营养与重要性在权威教材《营养与食品卫生学》中没有得到很好介绍。最新的研究表明,水不但担负体内物质输送与媒介

作用,而且直接参与生物大分子的结构,水与生物大分子共同完成了人体的物质代谢、能量代谢、信息代谢。水与遗传基因载体DNA持续不断地重组、复制、转录,以至形成相应蛋白质合成有密切的关系。因此,水质决定体质,水的质量决定生命的质量,健康的水成就人类的健康长寿。

目 录

绪论

第一章	水的化学性质	1
	第一节 水的无机化学.....	1
	第二节 水的有机化学.....	15
	第三节 水的分析化学.....	24
	第四节 水的物理化学.....	33
	第五节 水的生命化学.....	41
	第六节 水的量子化学.....	47
	第七节 水和水溶液的辐射化学.....	49
第二章	水的物理特性	65
	第一节 水的基本物理特性.....	65
	第二节 简介水的几个物理特性.....	74
	第三节 冰.....	76
	第四节 水的能量.....	80
第三章	水的生物学特性	84
	第一节 天然水体的生物学特性.....	84
	第二节 生命起源的化学进化过程.....	85

第四章	水的医学	87
	第一节 水的生理学	88
	第二节 水的生物化学	91
	第三节 水的营养学	104
	第四节 水的药理学	109
	第五节 水的卫生学	111
	第六节 水的医学实践	116
第五章	水的污染	124
	第一节 水污染概述	124
	第二节 水污染源类型	126
	第三节 水污染危害	136
第六章	水的处理技术	139
	第一节 反渗透技术	139
	第二节 超滤膜技术与超滤膜设备	150
	第三节 活性炭水处理技术	158
	第四节 电解离子水技术	167
	第五节 矿泉壶	169
	第六节 电凝聚技术	169
	第七节 磁化水处理技术	172
	第八节 KDF 水处理技术	175
	第九节 其他水处理技术简介	183
第七章	水质监测	186
	第一节 水质环境监测	186
	第二节 水质卫生监测	191
第八章	水的卫生标准和法规	194
	第一节 中国标准	194

第二节	世界卫生组织标准	214
第九章	天然水的特性	218
第一节	天然水的化学组成	219
第二节	天然水的化学分类法	220
第三节	天然水的光学特性	223
第四节	天然水的电导率	225
第五节	天然水的依数性	226
第六节	天然水的 pH 值	227
第七节	天然水的溶氧量	231
第十章	水与健康	242
第一节	水量与人体的健康	242
第二节	水污染与疾病	246
第三节	水中营养素与健康	248
第四节	水中锌与健康	253
第五节	水中活性氢与健康	259
第六节	各种类型水与健康	261
	致谢	274

水的化学性质

水是地球上分布范围最广的物质,江、河、湖、海等约占地球表面的 $3/4$ 。大气中含有许多水蒸气;土壤和岩层、动植物体内也含有大量水。动物体内水分约占 70% ,而新鲜植物体内 $80\% \sim 90\%$ 都是水。对于生物体来说,水和空气都是不可或缺的,没有水,就没有生命。水除能供给生物体的生理需要之外,清洁、烹调、取暖及工农业等方面都需要大量的水。

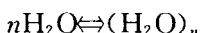
第一节 水的无机化学

一、水的组成和结构

18 世纪以前,人们一直认为水是一种单质,1781 年卡文迪西首先发现氢气在空气中燃烧生成唯一的产物是水,证明水是氢、氧元素的化合物。几年以后,拉瓦锡测定了水的质量组成。近代结构理论的研究指出, H_2O 分子呈“V”形结构,经 X 线对水的晶体(冰)结构的测定,证明两个 $O-H$ 键间形成 104.5° 的夹角。由于水分子的不对称结构,所以水是极性分子。

在沸点时测定水蒸气的分子量是 18.64,表明此时除单分子 H_2O 之外,还有约 3.5% 的双分子水 $(H_2O)_2$ 存在,液态水的分子量则更大,说明液态水中含有较复杂的 $(H_2O)_n$ 分子(n 可以是 2、3、4...)。事实证明,水中含有由简单分子结合而成的复杂分子 $(H_2O)_n$ 。这种由简单分子结合成为较复杂的分子集团而不引起物质化学性质改变的过程,称为分子的

缔合。



液态水中除含有简单分子 H_2O 外,同时还含有缔合分子 $(\text{H}_2\text{O})_2$ 、 $(\text{H}_2\text{O})_3$...缔合分子和简单分子处于平衡状态。缔合是放热过程,离解是吸热过程,所以,温度升高,水的缔合程度降低(n 减少),高温时水主要以单分子状态存在;温度降低,水的缔合程度增大(n 变大), 0°C 时水结成冰,全部水分子缔合在一起成为一个巨大的分子,在冰的结构中每个氧原子与 4 个氢原子相连接而成四面体,每个氢原子与两个氧原子相连接。冰的结构内有较大的空隙。水分子能发生缔合的主要原因是由于形成了分子间的氢键。

在水分子中氢与氧以共价键结合形成强极性键 $\text{H}-\text{O}$, 由于氧的电负性较大,电子对被强烈地引向氧的一方,而使氢带正电性,同时,氢原子用自己唯一的电子形成共价键后,已无内层电子,它不被其他原子的电子云所排斥,而能与另一水分子中氧上的孤电子对相吸引,结果水分子间便构成氢键 $\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}$ 而缔合在一起。 H 与原来水分子中氧以共价键结合,相距较近($0.948\text{\AA}$),而与另一水分子中氢则以氢键结合,相距较远($2.037\text{\AA}$)。所以, $\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}$ 之间的距离共 $2.985\text{\AA}$ 。

二、氢键

(一) 氢键的本质

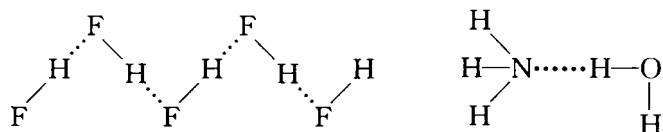
氢键是一种特殊的分子间作用力,氢原子与电负性很大、半径很小的原子 $\text{X}(\text{F}, \text{O}, \text{N})$ 以共价键形成强极性键 $\text{H}-\text{X}$, 这个氢原子还可以吸引另一个键上具有孤对电子、电负性大、半径小的原子 Y , 形成具有 $\text{X}-\text{H}\cdots\text{Y}$ 形式的物质。这时氢原子与 Y 原子之间的定向吸引力叫做氢键(以 $\text{H}\cdots\text{Y}$ 表示)。

氢键的本质一般认为主要是静电作用。在 $\text{X}-\text{H}\cdots\text{Y}$ 中, $\text{X}-\text{H}$ 是强极性共价键,由于 X 的电负性很大,吸引电子能力

强,使氢原子变成一个几乎没有电子云的“裸露”的质子而带部分正电荷。它的半径特别小,电场强度很大,又无内层电子,可以允许另一个带有部分负电荷的 Y 原子(即电负性大,半径小且有孤对电子的原子)充分接近它,从而产生强烈的静电相互作用而形成氢键。

一般分子形成氢键必须具备两个基本条件:① 分子中必须有一个与电负性很强的元素形成强极性键的氢原子。② 分子中必须有带孤对电子,电负性大,原子半径小的元素。

氢键常在同类分子或不同类分子之间形成,叫做分子间氢键,如氟化氢、氨水:



(二) 氢键的键长和键能

氢键的键长是指 $X-H\cdots Y$ 中 X 与 Y 原子的核间距离。在 HF 缔合而成的 $(HF)_n$ 缔合分子中,氢键的键长为 255 pm,而共价键(F—H 间)键长为 92 pm。由此可得出, $H\cdots F$ 间的距离为 163 pm。可见氢原子与另一个 HF 分子中的 F 原子相距是较远的。

氢键的键能是指破坏 $H\cdots Y$ 键所需要的能量。氢键的键能为 15~30 kJ/mol,比一般化学键的键能小得多,与范德华力的数量级相同。氢键的强弱与 X 和 Y 的电负性大小有关,还与 Y 的半径大小有关,电负性越大, Y 的半径越小,越能接近 H—X 键,形成的氢键也越强。例如, F 的电负性最大,半径又小,所以 $F-H\cdots F$ 是最强的氢键, $O-H\cdots O$ 次之, $O-H\cdots N$ 又次之, $N-H\cdots N$ 更次之。

(三) 氢键的饱和性和方向性

氢键具有饱和性和方向性。形成氢键的 3 个原子中 X 与 Y 尽量远离,其键角常在 $120^\circ\sim 180^\circ$, H 的配位数为 2。氢键的饱

和性表现在 $X-H$ 只能和一个 Y 原子相对合。因为 H 原子体积小, X 、 Y 都比氢大, 所以当有另一个 Y 原子接近它们时, 这个 Y 原子受到 $X-H\cdots Y$ 上 X 和 Y 的排斥力大于受到 H 原子的吸引力, 使得 $X-H\cdots Y$ 上的氢原子不能再和第二个 Y 原子结合, 这就是氢键的饱和性。

氢键的方向性是指 Y 原子与 $X-H$ 形成氢键时, 在尽可能的范围内使氢键的方向与 $X-H$ 键轴在同一个方向, 即以 H 原子为中心 3 个原子尽可能在一条直线上。氢原子尽量与 Y 原子的孤对电子方向一致, 这样引力较大; 3 个原子尽可能在一条直线上, 可使 X 与 Y 的距离最远, 斥力最小, 形成的氢键强。

(四) 氢键对物质性质的影响

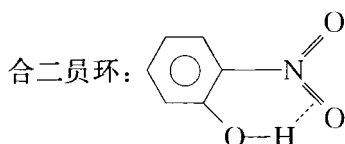
1. 对沸点和熔点的影响 在同类化合物中, 能形成分子间氢键的物质, 其熔点、沸点要比不能形成分子间氢键的物质的熔点、沸点高些。因为要使固体熔化或液体汽化, 不仅要破坏分子间的范德华力, 还必须提供额外的能量破坏氢键。 H_2O 、 HF 、 NH_3 的熔点和沸点比同族同类化合物为高(表 1-1), 因为它们都可形成分子间氢键。如第 VI A 族氧(O)、硫(S)、硒(Se)、碲(Te)的氢化物的沸点递变规律, 由 H_2Te , H_2Se 到 H_2S , 随分子量的递减, 分子的半径递减; 随分子间作用力的减小, 沸点递减。但分子量最小的 H_2O 的沸点却陡然升高。这是因为氧的电负性很强, H_2O 分子间形成了 $O-H\cdots O$ 氢键, 所以 H_2O 分子间作用力大于同族其他氢化物。VII A 和 V A 族氢化物沸点的变化规律中, HF 和 NH_3 也显得特殊, 这也是因为形成了 $F-H\cdots F$ 和 $N-H\cdots N$ 氢键。 H_2O 、 HF 、 NH_3 分子间的氢键, 在固态、液态都存在, 它们许多特性都可用氢键概念加以解释。例如, 绝大多数物质的密度, 总是固态大于液态的, 但 H_2O 在 $0^\circ C$ 附近的密度却是液态大于固态的。这是因为固态 H_2O (冰) 分子间存在 $O-H\cdots O$ 氢键, 使它具有空洞结构, 此时冰的密度就小于水, 所以冰可浮于水面。

表 1-1 H_2O 、 HF 、 NH_3 及其同族同类化合物的熔点(mp)、沸点(bp)

化合物	mp(°C)	bp(°C)	化合物	mp(°C)	bp(°C)	化合物	mp(°C)	bp(°C)
H_2O	0	100	HF	-80.3	19.5	NH_3	-77.7	-33.4
H_2S	-85.6	-60.7	HCl	-112	-84	PH_3	-133.5	-87.4
H_2Se	-64	-42	HBr	-88	-67.0	AsH_3	-116	-62
H_2Te	-48	-1.8	HI	-50.9	-35.4	SbH_3	-88	-17

2. 对溶解度的影响 在极性溶剂中,如果溶质分子和溶剂分子之间可以形成氢键,则溶质的溶解度增大。例如,苯胺和苯酚在水中的溶解度比在硝基苯中的溶解度要大。

氢键的存在使水具有很多反常性质。例如,凝结成冰时的反常膨胀,沸点高,密度小,热容量大。氢键不仅存在于分子间,也存在于分子内。如邻-硝基苯酚通过分子内氢键形成一个闭



结果它的沸点(45°C)比对位或间位的硝基苯酚(96°或114°C)要低,在水中的溶解度也较小。氢键的存在相当普遍,从水、醇、酚、酸、碱及胺等小分子到复杂的蛋白质等生物大分子都可形成氢键。氢键的存在直接影响分子的结构、构象、性质与功能。因此,研究氢键对认识物质具有特殊的意义。

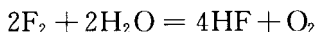
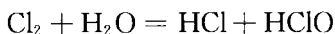
水分子簇中氢键的4种作用方式,包括协同效应、氢键的转动、氢键的振动以及氢键变换,对水分子簇存在状态有影响。

三、水的氧化还原反应

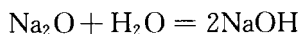
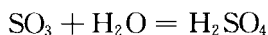
水分子在通常状况下是很稳定的,但是在高温($\geq 2000^\circ\text{C}$)或电流的作用下,水能分解成氢气和氧气。根据水对热的稳定性,工业上常用锅炉把水加热成高温、高压的水蒸气来传递热量。水在常温下可以和一些化学性质较活泼的金属,如钾、钠、钙等进行反应,从水中置换出氢气。如钠和水起反应生成氢氧化钠和氢气。水与某些非金属也能反应,在工业上常用的熟石

灰(氢氧化钙)就是水和氧化钙(生石灰)反应生成的。

$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{Na} = 2\text{NaOH} + \text{H}_2$ ，一般而言，水在常温下和活泼金属反应，生成碱和氢气，在高温下，能和较活泼的金属如： $\text{Mg} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$ (反应需要加热)反应。水和非金属单质发生反应(大多是非氧化还原反应)



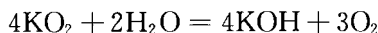
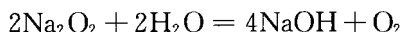
水能够和氧化物发生反应，生成碱或酸：



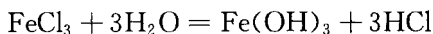
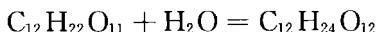
水能够辅助生成酸式盐：



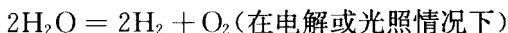
水能够和过氧化物、超氧化物反应，生成氧气：



水能够和有机物、无机盐发生水解反应：



一般情况下是可逆反应，但是由于水解吸热，所以加热能够促进水解。在加热条件下，上述反应能够进行完全。

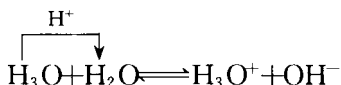


四、水的电离

水是一种很弱的电解质，它也能电离： $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$

水溶液中的离子都是以水合离子状态存在的，水电离出的氢离子和氢氧根离子也是水合离子。水合氢离子可以用 H_3O_4^+ 表示，通常可简写为 H_3O^+ 。

水是一种既能释放质子也能接受质子的两性物质。水在一定程度上也微弱地离解,质子从一个水分子转移给另一个水分子,形成 H_3O^+ 和 OH^- 。



达到平衡时,可得水的离解常数 K_i

$$\frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]^2} = K_i$$

$$\text{或 } [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = K_i[\text{H}_2\text{O}]^2$$

由于水的离解度极小, $[\text{H}_2\text{O}]^2$ 数值可以看作是一个常数,令 $K_i[\text{H}_2\text{O}]^2$ 等于另一新常数 K_w ,则

$$[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = K_w$$

根据实验测定, 22°C 达电离平衡时, 1 L 纯水仅有 10^{-7} mol 水分子电离, 由实验测出在纯水中 $[\text{H}_3\text{O}^+]$ 和 $[\text{OH}^-]$ 各为 1.0×10^{-7} mol/L。通常将水合离子 H_3O^+ 简写为 H^+ 。因此, 水中 $[\text{H}^+]$ 和 $[\text{OH}^-]$ 都等于 10^{-7} mol。 22°C 时, 1 L 纯水相当于 55.4 mol 的水, 10^{-7} mol 与 55.4 mol 相比太小了。因此, 电离前后水的摩尔浓度几乎未变, 仍可看作常数, 它的浓度不写在平衡关系式中。这样, 水的电离平衡可表示为:

$$K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-]$$

K_w 为水的离子积常数, 简称水的离子积。上式表示在一定温度时, 水中氢离子浓度与氢氧离子浓度的乘积为一常数, 它表明在一定温度下, 水中的 H^+ 离子和 OH^- 离子的浓度之间的关系。

$$\text{在常温}(22^\circ\text{C}\text{时}): [\text{H}^+][\text{OH}^-] = 1 \times 10^{-14}$$

由于水离解时要吸收大量的热, 水的电离是吸热反应。所以温度升高, 水的离解度和水的离子积也相应增大。但在常温 (22°C 左右) 时, 一般可认为 $K_w = 1 \times 10^{-14}$

水的离子积原理不仅适用于纯水, 也适用于一切稀的水溶

液。在任何稀的水溶液中,不论 $[\text{H}^+]$ 和 $[\text{OH}^-]$ 怎样改变,它们的乘积总是等于 K_w 。

不同温度时水的离子积常数见表 1-2。

表 1-2 不同温度时水的离子积常数

温度(℃)	K_w	温度(℃)	K_w
0	1.3×10^{-15}	25	1.27×10^{-14}
18	7.4×10^{-15}	50	5.6×10^{-14}
22	1.00×10^{-14}	100	7.4×10^{-13}

五、pH 值与缓冲溶液

溶液中进行的化学反应,特别是生物体内的化学反应,往往需要在一定的 pH 值条件下才能正常进行。人的各种体液都有一定的 pH 值,因为体液本身就是缓冲溶液,具有抵抗外来少量强酸或强碱的能力,从而能够稳定溶液的 pH 值。保证人体正常的生理活动。

既然 K_w 反映了水溶液中 H^+ 浓度和 OH^- 浓度之间的相互关系,所以知道了 H^+ 浓度;就可以计算出 OH^- 浓度;反之亦然。在纯水中, $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 1 \times 10^{-7} \text{ mol}$,所以纯水显中性。任何物质的水溶液,不论它是中性、酸性还是碱性,都同时含有 H^+ 和 OH^- ,只不过是它们的相对多少不同而已。同一溶液中始终保持着 $[\text{H}^+][\text{OH}^-] = K_w$ 的关系,知道溶液中的 H^+ 浓度,也就知道了 OH^- 浓度。

根据 H^+ 和 OH^- 相互依存、相互制约的关系,可以统一用 $[\text{H}^+]$ 或 $[\text{OH}^-]$ 来表示溶液的酸碱性。溶液是酸性还是碱性,主要是由溶液中的 $[\text{H}^+]$ 和 $[\text{OH}^-]$ 的相对大小来决定。

$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 1 \times 10^{-7} \text{ mol}$ 时,溶液显中性;

$[\text{H}^+] > 1 \times 10^{-7} \text{ mol}$, $[\text{H}^+] > [\text{OH}^-]$ 时,溶液显酸性;

$[\text{H}^+] < 1 \times 10^{-7} \text{ mol}$, $[\text{H}^+] < [\text{OH}^-]$ 时,溶液显碱性。

(一) 溶液的 pH 值

在纯水或中性溶液中,22℃时