

中国高等教育学会医学教育专业委员会规划教材

全国高等医学院校教材

供基础、临床、预防、口腔医学类专业用

# 基础化学

---

主编 杨晓达 王美玲

*Basic Chemistry*



北京大学医学出版社

中国高等教育学会医学教育专业委员会规划教材  
全国高等医学院校教材

供基础、临床、预防、口腔医学类专业用

# 基础化学

## Basic Chemistry

主 编 杨晓达 王美玲

副主编 张乐华 李 森

编 委 (按姓名汉语拼音排序)

李 森 (哈尔滨医科大学)

刘 君 (济宁医学院)

刘会雪 (北京大学医学部)

刘进军 (承德医学院)

孙 革 (齐齐哈尔医学院)

王广斗 (河北工程大学医学院)

王美玲 (内蒙古医科大学)

杨晓达 (北京大学医学部)

尹富玲 (北京大学医学部)

张乐华 (哈尔滨医科大学)

北京大学医学出版社

JICHU HUAXUE

图书在版编目 (CIP) 数据

基础化学/杨晓达, 王美玲主编. —北京: 北京大学  
医学出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-5659-0763-0

I. ①基… II. ①杨…②王… III. ①化学—医学院校—  
教材 IV. ①O6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 315039 号

## 基础化学

---

主 编: 杨晓达 王美玲

出版发行: 北京大学医学出版社 (电话: 010-82802230)

地 址: (100191) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内

网 址: <http://www.pumpress.com.cn>

E - mail: [booksale@bjmu.edu.cn](mailto:booksale@bjmu.edu.cn)

印 刷: 北京地泰德印刷有限公司

经 销: 新华书店

责任编辑: 赵 欣 责任校对: 金彤文 责任印制: 张京生

开 本: 850mm×1168mm 1/16 印张: 18.5 彩插: 1 字数: 533 千字

版 次: 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5659-0763-0

定 价: 36.00 元

版权所有, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

# 全国高等医学院校临床专业本科教材评审委员会

主任委员 王德炳 柯 杨

副主任委员 吕兆丰 程伯基

秘书长 陆银道 王凤廷

委 员 (按姓名汉语拼音排序)

白咸勇 曹德品 陈育民 崔慧先 董 志

郭志坤 韩 松 黄爱民 井西学 黎孟枫

刘传勇 刘志跃 宋焱峰 宋印利 宋远航

孙 莉 唐世英 王 宪 王维民 温小军

文民刚 线福华 袁聚祥 曾晓荣 张 宁

张建中 张金钟 张培功 张向阳 张晓杰

周增桓

# 序

北京大学医学出版社组织编写的全国高等医学院校临床医学专业本科教材（第2套）于2008年出版，共32种，获得了广大医学院校师生的欢迎，并被评为教育部“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。这是在教育部教育改革、提倡教材多元化的精神指导下，我国高等医学教材建设的一个重要成果。为配合《国家中长期教育改革和发展纲要（2010—2020年）》，培养符合时代要求的医学专业人，并配合教育部“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材建设，北京大学医学出版社于2013年正式启动全国高等医学院校临床医学专业（本科）第3套教材的修订及编写工作。本套教材近六十种，其中新启动教材二十余种。

本套教材的编写以“符合人才培养需求，体现教育改革成果，确保教材质量，形式新颖创新”为指导思想，配合教育部、国家卫生和计划生育委员会在医药卫生体制改革意见中指出的，要逐步建立“5+3”（五年医学院校本科教育加三年住院医师规范化培训）为主体的临床医学人才培养体系。我们广泛收集了对上版教材的反馈意见。同时，在教材编写过程中，我们将与更多的院校合作，尤其是新启动的二十余种教材，吸收了更多富有一线教学经验的老师参加编写，为本套教材注入了新鲜的活力。

新版教材在继承和发扬原教材结构优点的基础上，修改不足之处，从而更加层次分明、逻辑性强、结构严谨、文字简洁流畅。除了内容新颖、严谨以外，在版式、印刷和装帧方面，我们做了一些新的尝试，力求做到既有启发性又能引起学生的兴趣，使本套教材的内容和形式再次跃上一个新的台阶。为此，我们还建立了数字化平台，在这个平台上，为适应我国数字化教学、为教材立体化建设作出尝试。

在编写第3套教材时，一些曾担任第2套教材的主编由于年事已高，此次不再担任主编，但他们对改版工作提出了很多宝贵的意见。前两套教材的作者为本套教材的日臻完善打下了坚实的基础。对他们所作出的贡献，我们表示衷心的感谢。

尽管本套教材的编者都是多年工作在教学第一线的教师，但基于现有的水平，书中难免存在不当之处，欢迎广大师生和读者批评指正。

王德炳 柯杨

2013年11月

# 前 言

21 世纪是信息科学和生命科学的时代。特别是信息技术的发展和普及,已经彻底改变了知识传播的方式,也对当代教育的模式构成了严重的冲击。可以说,传统的知识教育模式正在过时。无论在哪一个学科,知识发现和知识爆炸已经成为现实,而相应的,如何实现将凝固的“知识”到生动的“应用”日益成为无论是科学家还是教育家都必须面对的问题。事实上,近年来转化医学已成为各国生物医学领域中的一个重要内容,“以转化医学为核心,大力提升医学科技水平,强化医药卫生重点学科建设”也成为《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十二个五年规划的建议》中的意见。

化学教育是医学教育的重要基础,然而如何给医学生讲化学课,让学生领会到化学不仅是一种科学的基本训练,更重要的是医学的一种内在思维方式和基本操作工具,这一直是一件较困难的事情。套用美国西北大学化学系 H. A. Godwin 教授的感言:“Many of us have tried to incorporate biological examples into our introductory chemistry courses, but these often end up feeling like a Band-Aid that has been applied to a problem requiring major surgery.” (*Nature Chemistry Biology*, 2005, 1:176-179)。如何实现化学和生物医学应用的完美结合一直是在医学院校从事化学基础教育的教师不断追求的目标。

为配合教育部“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材建设,北京大学医学出版社启动了全国高等医学院校临床医学专业(本科)教材的修订和编写工作。在符合人才培养要求、体现教育改革成果、确保教材质量、形式新颖创新的指导思想下,我们编写了《基础化学》。本书是由多个学校具有丰富基础化学教学经验的教师集体创作的结晶。全书由杨晓达和王美玲一起完成统稿和审订。附录由尹富玲编写。此外,还有许多老师和同学对本书的编写提供了帮助,在这里一并致谢!

本书针对生物医学类学生的专业需求和兴趣特点写作,编者在本书内容选择和讲解方式上做了新的尝试,努力使基础化学学习不仅是基础知识的传授,更激发学生们主动学习和培养创新能力。在兼顾化学知识体系的完整性之余,最大限度地压缩教学时间。编者建议本书使用者,对全书可分成 45 个学时讲授,各章内容建议分配为:第一章,1 学时;第二章,3 学时;第三章,5 学时;第四章,4 学时;第五章,4 学时;第六章,4 学时;第七章,3 学时;第八章,2 学时;第九章,2 学时;第十章,4 学时;第十一章,6 学时;第十二章,4 学时;第十三章,3 学时。当然,也建议使用者根据实际的教学要求和学生的情况,因材施教,组织具有特色的教学。

由于能力有限,书中难免存在错误和遗漏,欢迎各位老师和读者批评指正。

编 者

# 目 录

第一章 绪论 .....	1	第七章 滴定分析法 .....	109
思考题 .....	5	习题 .....	124
第二章 溶液的性质 .....	6	第八章 溶胶和凝胶 .....	126
第一节 溶液的分类 .....	6	第一节 溶胶 .....	126
第二节 溶液的组成标度 .....	7	第二节 高分子溶液 .....	133
第三节 电解质溶液 .....	9	第三节 凝胶 .....	135
第四节 稀溶液的依数性 .....	13	思考题 .....	138
思考题 .....	19	习题 .....	138
习题 .....	20	第九章 沉淀反应 .....	139
第三章 酸碱和缓冲溶液 .....	21	第一节 标准溶度积常数 .....	139
第一节 酸碱质子理论 .....	21	第二节 沉淀的类型和形成过程 .....	145
第二节 水的解离平衡和溶液的酸度 .....	22	第三节 生物矿物简介 .....	147
第三节 弱酸和弱碱的解离平衡 .....	23	思考题 .....	150
第四节 缓冲溶液 .....	31	习题 .....	151
思考题 .....	42	第十章 原子结构和元素性质 .....	154
习题 .....	43	第一节 氢原子结构 .....	154
第四章 化学热力学 .....	47	第二节 氢原子的原子轨道 .....	159
第一节 化学热力学基本概念和热力学 .....	47	第三节 多电子原子的核外电子排布 .....	165
第一定律 .....	47	第四节 元素周期表与元素周期律 .....	167
第二节 化学反应的方向和限度 .....	53	第五节 一些重要的元素及其性质 .....	171
思考题 .....	65	思考题 .....	183
习题 .....	66	习题 .....	183
第五章 化学动力学 .....	68	第十一章 分子结构和分子间作用力 .....	185
第一节 动力学基本概念 .....	69	第一节 离子键和晶体结构 .....	185
第二节 简单级数的反应的数学计算 .....	73	第二节 共价键的本质 .....	189
第三节 影响反应速率的因素及控制 .....	77	第三节 杂化轨道理论 .....	195
反应速率的策略 .....	77	第四节 价层电子对互斥理论简介 .....	199
思考题 .....	82	第五节 分子轨道理论简介 .....	201
习题 .....	83	第六节 分子间作用力 .....	205
第六章 氧化还原反应 .....	85	思考题 .....	211
第一节 氧化还原反应的基本概念 .....	85	第十二章 配位化合物 .....	213
第二节 原电池 .....	88	第一节 配合物的特点、组成和命名 .....	213
第三节 浓差电池、膜电势和电化学分 .....	99	第二节 配合物的化学键理论和异构 .....	218
析法 .....	99	现象 .....	218
习题 .....	107	第三节 配位平衡 .....	230
		习题 .....	241

第十三章 化学染色和仪器分析 .....	244	(298.15K) .....	263
第一节 光谱分析技术 .....	245	附录四 酸碱解离常数和缓冲溶液 .....	266
第二节 其他重要仪器分析方法 .....	252	附录五 一些难溶化合物的溶度积常数	
第三节 重要的分离、分析方法 .....	254	(298.15K) .....	269
第四节 显微分析技术 .....	256	附录六 标准电极电势表	
习题 .....	258	(298.15K、101.325kPa) .....	271
附录一 有关计量单位 .....	260	附录七 金属配合物的累积稳定常数 ...	273
附录二 一些基本物理常数 .....	262	主要参考文献 .....	277
附录三 一些物质的基本热力学数据		中英文专业词汇索引 .....	278



# 第一章 绪 论

基础化学是医学生的入门课之一。医学生为什么要学习化学原理呢？当新生入学时，可能听到一些前辈谈及多年后已经忘记化学了之类的言语。一个很自然的问题是：化学原理对医学生是必需的吗？那么，就让我们在第一课用一点时间讨论一下这个问题。

“医学生”的未来自然是成为“医生”。“医生”和“医学生”字面的差别是前者少了一个“学”字。但是，这并非是说成为医生后就再不需要“学”了。事实上，医生是需要终身学习的。我国卫生部门规定，医生、护士以及医技人员每年均需要通过自学、参加培训和从事科研等方法完成一定的“继续教育学分”；继续医学教育合格作为聘任、晋升和执业再注册的必备条件之一。自学和以问题为中心的学习（problem-based learning, PBL）是医学继续教育学习的基本方式，而这种学习方式需要全面和扎实的学科基础。

医生，中国传统上称为“大夫”。“大夫”本质上是个“官”。“修身、齐家、治国、平天下”已是中国几千年来的政治传统。《国语·晋语》载曰：“上医医国，其次疾人。固医，官也”。医圣孙思邈则在其《千金要方》中说：“古之善为医者，上医医国，中医医人，下医医病”。又曰：“上医医未病之病，中医医欲病之病，下医医已病之病”。这里，“上医医国”并不是说让医生去治理国家、除患祛弊，而是强调一个好医生不仅仅是一个处理病患的技师，更是一个能够指导人们通过改善社会环境和调节生活方式而预防疾病发生的“大夫”。疾病预防不是简单的个人问题；事实上，在现代医学中，预防医学是公共卫生的核心内容，疾病预防（disease prevention）和疾病控制（disease control）主要是通过卫生政策和健康保障体系来实现的，所以说“上医医国”。“大夫”这个称呼确实体现了医生的作用和社会地位，也决定了好医生决不能仅仅掌握一些实用的医学技术和医学知识，而是要求有多学科的开阔眼界和深厚的哲学和人文底蕴。

在西方，医生则被称为“博士（Doctor）”。Doctor来自古法语 docere（teach），这意味着医生是一个接受了多年的全面教育并有能力指导别人的人。著名医学教材《西氏内科学》（*the Cecil-Loeb Textbook of Medicine*）的主编之一 Dr. McDermott 在论述医学时说：“Medicine itself is deeply rooted in a number of sciences.” 这表明了医学生必须具备扎实的理学基础，其中化学就是必需基础之一。

化学作为一种中心科学，向生物医学提供了理解生命过程的基本思想、基本原理和重要方法。这一点从西方医学史可以看到。

西方医学的源头是古希腊和罗马医学。从“医学之父”希波克拉底（Hippokrates）到文艺复兴时期，古典医学一直是由克劳修斯·盖伦（Galen）总结并系统化的正确和错误交织的医学体系。17世纪之前，西方医生基本不知使用药物，无论对什么病，治疗方法都是灌肠、放血和导泻。真正的突破来自帕拉塞萨斯（1493—1541）。帕拉塞萨斯是瑞士人，因崇尚著名罗马医学作家塞尔苏斯（Celsus），他给自己取名为帕拉塞萨斯（Paracelsus），表示他和塞尔苏斯一样伟大（图 1-1）。帕拉塞萨斯在奥地利学习矿物学和金属学，当时化学还只是炼金术。帕拉塞萨斯认为人体的表现形式是遵循化学规则的。他提出新陈代谢的概念。帕拉塞萨斯在 1517—1526 年期间游历了欧洲各国，激烈抨击盖伦医学理论，公开烧毁盖伦和其后的阿维森纳的著作。帕拉塞萨斯告诉学生：书籍是死东西的，自然却是真实和有吸引力的，实验才是一



图 1-1 帕拉塞萨斯画像

副灵丹妙药。帕拉塞萨斯将化学药物引入到医学中，其中最著名的是他使用汞制剂治疗梅毒。化学药物在锑制剂（抗寄生虫病）和奎宁（抗疟疾）后，逐渐发展和获得普遍使用。1935年，格哈德·杜马克发明了偶氮磺胺，标志了现代化学疗法的开端。迄今，一些老药物仍然发挥着重要作用，如酒石酸锑钾仍是目前治疗黑热病的特效药物。在中国，酒石酸锑钾被加入到复方甘草合剂中，直到2004年才因较大的药物毒性被取消使用。合成的阿司匹林自1899年被德国人引入医学中后，一直用于止痛、退热和治疗风湿病等，近来也用于预防流产和心血管病，仅美国一年就消耗10吨以上。

17世纪中期物理医学和化学医学的建立标志了从西方医学古代教条到自由医学思想的转变已基本完成。化学医学学派由法国人西尔维厄斯建立，认为所有生理现象都可以用化学方式来解释，这一观点仍是现代分子医学的基石。安东尼·拉瓦西（1743—1794）既是现代化学之父，也是一位著名的生理学家。拉瓦西在发现了氧元素的基础上，发现氧气在肺部由血液携带到全身，氧气利用后生成二氧化碳，因此呼吸是像燃烧一样的氧化过程，揭示了呼吸作用的真正机制。1910年，玛利亚·居里夫人成功分离出了放射性金属元素镭，开启了放射化学和同位素化学研究，同时也开始了一门新医学——放射治疗医学（图1-2）。镭和各种放射性核素可以被注入到人体恶性病变组织中，用于治疗子宫癌、膀胱癌和舌部肿瘤等，也可作为示踪元素来确定生物分子或药物分子在体内的代谢途径。放射医学在当今的临床诊断和治疗中都发挥了巨大的作用。



图 1-2 居里夫人和女儿在实验室

居里夫人发现放射性元素后，开启了放射治疗医学。中图是早期放射治疗乳腺癌，右图是我国早期的肿瘤放疗

20世纪，分子生物学诞生——这是真正意义的现代医学。分子生物学的基石是分子生物学。1953年，詹姆斯·沃森和安得鲁·克里克成功解析了DNA的双螺旋分子结构。在1965年，生物化学家马歇尔·尼伦伯格完成了对遗传密码的解码工作。随即，克里克在1971年提出了遗传的中心法则（图1-3）。分子生物学是20世纪重要的学术进展，它带动了分子生物学的进步和人类基因组和蛋白质组研究计划的启动和实施，使21世纪成为生命科学的世纪。

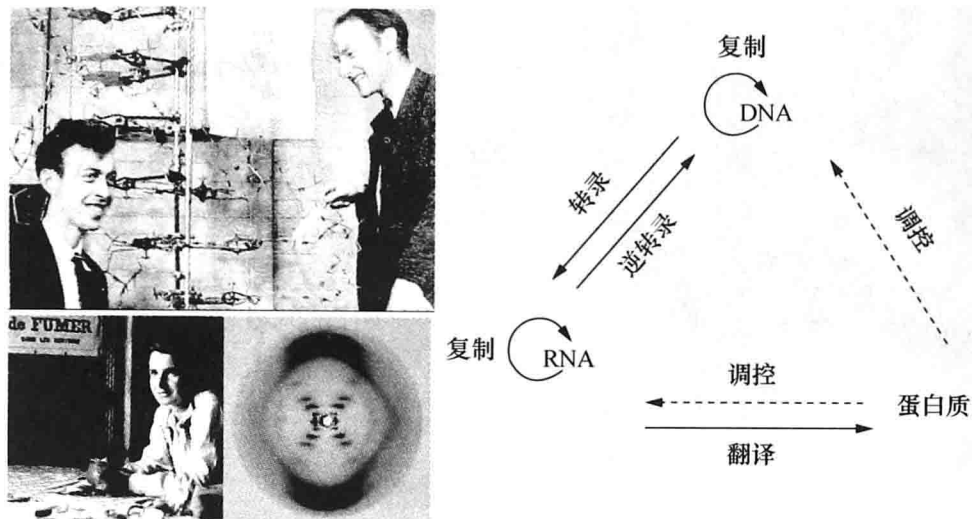


图 1-3 克里克和沃森及他们的 DNA 分子模型

克里克和沃森在富兰克林及其 DNA 晶体衍射研究（左）的基础上提出了 DNA 双螺旋结构，奠定了分子生物学中心法则的基础（右）。富兰克林是位才华横溢的女科学家，遗憾的是年仅 38 岁就被卵巢癌夺走了生命

化学不仅为医学提供了发展的思想和基础，也为医学提供了基本的方法和手段。医学微生物学的发展依赖于显微镜的应用。但各种微生物化学染色方法的发明，使所有微生物成为可观察对象，极大地促进了微生物学的迅速发展。例如，1884 丹麦医生汉斯·克里斯蒂安·革兰 (Christian Gram) 创立的革兰染色法。利用细菌细胞壁上的主要成分不同，革兰染色法可将细菌分成两大类，至今仍是微生物学研究中最常用的方法之一。实际上，无论是用光学还是电子显微镜方法观察细菌或病毒结构，化学染色都是一个必不可少的步骤。化学检验从化学医学流派开始，发展至今已经成为现代医学中基础的诊断方法。而在未来医学中，化学检验的作用将进一步得到加强。除了化学药物和化学检验外，化学还为医学提供了多种多样的试剂和医学材料。可以说，化学是医学和生命科学的最重要的工具箱。

综上所述，化学基础之于医学生来说，不是一种知识拓展的外在要求，而是一种内在需要，是成为好医生的基础。所以必须学好化学。

也许有人会争辩，我是学中医的，熟记了中医经典，掌握了望闻问切，精通了《本草纲目》就可以了；古来中医名家都是不懂化学的。这点没有错，如果中医只是想停留在古代，中医医生没有现代科学基础完全没问题。但是，面对日新月异的科技发展，如此停滞不前的中医有未来吗？如任何生命体一样，随着时间的推移，不进化则必然灭绝。《尚书》曰：“惟新厥德”。《大学》曰：“苟日新，日日新，又日新”。古人尚知如此，今天的医学生又如何能够继续抱残守缺呢？

传统中医应当如何革新呢？这里引用已故著名科学家和思想家、中国导弹之父钱学森先生的话。他指出“中医理论不是现代意义上的科学”，因此，中医必须走现代化之路。“中医现代化，是中医的未来化”，“如果把西方的科学同中医所总结的理论以及临床实践结合起来，那将是不得了的”。中医现代化，不仅是学科发展需要，也是文化和民族发展的要求。毛泽东主席早在延安时期就提出“中西医合作，开展群众卫生运动”的思想（图 1-4）。1956 年，为应对当时废除中医的思潮，毛主席正式提出“中西医结合”，也从此确立了中国政府长期以来支持中医发展的政策基础。中医的未来，需要一批具有深厚自然科学素养的新中医学者，去实现中医的现代化，学好化学是未来中医的必需基础。

接下来，如何学习基础化学呢？

首先，先总体了解一下基础化学的内容。化学科学研究物质的组成、性质和物质间转化的规律。基础化学讲解与医学相关的最基本但具有化学科学完备性和系统性的基础原理和基础知识。





团结新老中西各部分  
 医药卫生界人员，发扬  
 祖国医药之长处，为开展  
 伟大的人民卫生工作  
 而奋斗  
 毛泽东

图 1-4 毛泽东和钱学森在一起

毛泽东和钱学森生前都提倡中医现代化和中西医结合，钱学森指出“医学的方向是中医的现代化”。

右图是毛泽东关于中西医结合的题词，确立了中国政府长期以来支持中医发展的政策基础

物质结构是一切性质、功能和变化的基础。物质的最基本组成单元是原子；原子通过化学键形成具有各种功能的分子。分子通过分子间作用力和自组装作用形成大千世界的万物。万物的相互转化通过各种化学反应的过程进行，基本的化学反应包括了酸碱反应、沉淀反应、氧化还原反应和配位反应四种反应。化学反应是一种物质的运动过程，因此也遵循物理世界中能量的流动和转化规则——化学热力学和动力学原理。此外，在生命体系中，绝大多数的化学反应都在溶液中进行，基础化学将主要针对溶液中物质的性质和化学反应进行讲解。物质结构原理、化学反应的热力学和动力学原理、溶液中的基本性质和化学反应原理构成基础化学的内容。掌握了这些原理及其哲学思想，就完成了基本的化学素养训练，即使未来忘却了大多数的化学知识，也将受用终生。

其次，要按照科学的规律去掌握这些原理。在西方语言中，科学 science 是理解宇宙规律的一种“途径”，关键包括两点：一是思路，二是方法。中国传统的三个治学要点正好描述了系统掌握科学理论的三个方面。

1. “象 (observation)” 对现象的观察、归纳和表述是科学研究的起点。在《福尔摩斯探案记》中，福尔摩斯有句名言：别人在浏览 (watch)，而他是在观察 (observe)。

2. “理 (logic)” 现象和过程背后存在的因果联系和逻辑关系，即所谓“理”或“本质”或“规律”。对现象的逻辑演绎分析，是发现物理化学原理和规律的途径。

3. “数 (math)” 数学推算是科学演绎分析的精髓所在。牛顿把论述万有引力理论的书命名为“自然科学中的数学原理”。任何科学理论只有数学化后，才能真正被人们利用来预测事物发展，才能根据物理原理制作实用的工具。古人云：君子性非异也，善假于物也。现代科学的重要成就正是为我们的工作生活提供了各种应用工具。

只有完整掌握了“象”“理”“数”三个方面，才是真正掌握了一门科学。数学推演能力是目前中国学生的薄弱环节，需要加强培养。

大学学习应该掌握正确的方法。21 世纪是信息技术的时代。当今，互联网带来了无限开放和延伸的知识空间，多媒体、虚拟现实和多维远程教育正在改变人们的教育和学习方式。当今时代，“博闻强记”的知识教育已经过时。除了教科书和教学参考书，讲座和科技文献都是学习的“课本”，而教师、图书馆、Internet 网络、实验室都是学生可利用的学习资源。在当今大学学习中，同学们将通过和各种“资源”之间的交流，获取新知识，实现自我的更新和能力的提高。也就是说：交流和更新是大学学习的方式。因此，主动的学习、融洽的交流、清晰的表达、理性的方案、有条理的行动、独立的思考和创新的思维是同学应注重的自我能力培养

的方向。

## 思考题

1. 化学对医学的意义是什么?
2. 如何完整掌握一门科学?
3. 大学基础化学学习的方式是什么?
4. 试根据教材总结基础化学的基本内容和相互联系。

(杨晓达)

## 第二章 溶液的性质

### 第一节 溶液的分类

溶液是将一种以上物质溶解到液体（如水）中形成的均匀分散系统。生命需要基本的液体介质——水；各种生物分子都存在于水中，形成溶液。人体内的血液、细胞液、细胞外液以及其他体液都是溶液，营养物质的消化、吸收等无不与溶液有关；体内的许多化学反应都是在溶液中进行的。因此溶液与人类的生命活动息息相关，也与医学有着密切联系。

将一种（或几种）物质粒子分散到另一种物质里所形成的混合物，称为分散系统（disperse system），如溶液。被分散的物质粒子叫作分散相（dispersed phase）；分散相粒子的形式可以是分子、离子或分子聚集体。而容纳分散相的溶剂介质称为分散介质（disperse medium）。形成的分散系统可以是气态（如云雾）、固态（如合金）和液态（生理盐水、牛奶和血液等）。如临床上使用的生理盐水和葡萄糖溶液，其中氯化钠和葡萄糖是分散相，水是分散介质。

溶胶是分散系中性质较为特殊的一种。溶胶在自然界尤其是生物界普遍存在，与人类的生活及环境有着非常密切的关系。了解生命就必须了解溶液和溶胶的各种性质。

按分散系统中分散相粒子直径的大小可将液体分散系统分为三类：真溶液（其粒子直径小于1nm）；胶体分散系（其粒子的直径在1~100nm之间）；粗分散系（其粒子的直径大于100nm）（表2-1）。

表 2-1 按照分散相颗粒大小对分散系统的分类

分散相粒子大小	分散系统类型	分散相粒子的组成	一般性质	实例
<1nm	真溶液	小分子或离子	均相；热力学稳定系统；分散相粒子扩散快，能过滤滤纸和半透膜	NaCl、NaOH、蔗糖的水溶液
	溶胶	固体小颗粒	非均相；热力学不稳定系统；分散相粒子扩散慢，能过滤滤纸，不能透过半透膜	氢氧化铁、硫化砷、碘化银及金、银、硫等单质溶胶
1~100nm	胶体分散系	高分子	均相；热力学稳定系统；分散相粒子扩散慢，能过滤滤纸，不能透过半透膜	蛋白质、核酸等水溶液，橡胶的苯溶液
	缔合胶体	分子的聚集体	均相；热力学稳定系统；分散相粒子扩散慢，能过滤滤纸，不能透过半透膜	脂质体
>100nm	粗分散系（乳状液、悬浮液）	固体粗颗粒或液滴	非均相；热力学不稳定系统；分散相粒子不能透过滤纸和半透膜	乳汁、泥浆等

## 第二节 溶液的组成标度

溶液是溶质 (solute) 分子分散到溶剂 (solvent) 中形成的分布均匀而且性质稳定的均相系统, 这个分散过程叫溶解 (dissolution)。例如在生理盐水中, NaCl 是溶质, 水是溶剂; 对于医用消毒酒精, 水是溶质, 乙醇是溶剂。对生物系统来说, 水溶液 (aqueous solution) 是非常重要的, 许多重要的生化反应及生理过程都是在水溶液中完成的, 因此, 认识溶液组成标度的各种表示方法是十分必要的。

### 一、质量浓度

溶质 B 的质量浓度 (mass concentration) 定义为溶质 B 的质量除以溶液的体积, 用符号  $\rho_B$  表示, 即:

$$\rho_B = \frac{m_B}{V} \quad (2-1)$$

式中,  $m_B$  为溶质 B 的质量;  $V$  为溶液的体积。 $\rho_B$  的 SI 单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 医学上常用的单位为  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

**【例 2-1】** 将 30g 葡萄糖 ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) 晶体溶于水配成 600ml 葡萄糖溶液, 计算葡萄糖溶液的质量浓度。

**解:** 根据式 (2-1), 葡萄糖溶液的质量浓度为:

$$\rho(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = \frac{m(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6)}{V} = \frac{30\text{g}}{0.6\text{L}} = 50\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$$

### 二、物质的量与物质的量浓度

1. 物质的量 物质的量 (amount of substance) 是表示物质数量的基本物理量。物质 B 的物质的量用符号  $n_B$  表示。国际标准规定, 物质的量基本单位是摩尔 (mole), 单位符号为 mol。1mol 某物质的粒子数目大致为  $6.022 \times 10^{23}$  个, 这个数目称为阿伏伽德罗常数; 换句话说, 每  $6.022 \times 10^{23}$  个物质的分子 (或离子、分子团等) 称为 1mol。1mol 物质 B 的质量则称为 B 物质的摩尔质量 (molar mass), 用符号  $M_B$  表示, 即

$$M_B = \frac{m_B}{n_B} \quad (2-2)$$

摩尔质量的常用单位是  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。某原子的相对原子质量在数值上等于该原子的摩尔质量。某分子的相对分子质量在数值上等于该种分子的摩尔质量。

**【例 2-2】** 计算水分子 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 和由于氢键形成的水分子团  $[(\text{H}_2\text{O})_{400}]$  的摩尔质量。

**解:** O 的相对原子质量为 16.0, H 的相对原子质量为 1.0, 因此  $\text{H}_2\text{O}$  的摩尔质量为:

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 16.0 + 2 \times 1.0 = 18.0\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

由 400 个水分子构成的分子团  $(\text{H}_2\text{O})_{400}$  的摩尔质量为:

$$400 \times 18.0 = 7.2 \times 10^3\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

需要指出的是书写某物质的摩尔质量时, 必须同时标明该物质的化学式, 即对该物质的计数方法。这是因为一些化学物质并没有明确的分子定义, 需要特别指明该物质的基本计数单元是什么。例如氯化钾, 它是离子晶体, 当溶解在水中后会发生解离, 其形式是一个个的  $\text{K}^+$  和  $\text{Cl}^-$ , 而在苯中则是一些离子团  $[(\text{KCl})_n]$ 。因此, 需要明确地标明:

(1) 如果写成 KCl, 则表示计数的单位是 1 个  $\text{K}^+$  和 1 个  $\text{Cl}^-$  的离子对, 则其摩尔质量为  $74.6\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

(2) 如果写成  $2\text{KCl}$ , 则表示计数的单位是 1 个  $\text{KCl}$  对, 则其摩尔质量为  $149.2\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

(3) 如果写成  $\frac{1}{2}\text{KCl}$ , 则表示计数的单位是半个  $\text{KCl}$  对, 则其摩尔质量为  $37.3\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

当然, 上面半个  $\text{KCl}$  对没有什么物理意义, 仅仅强调计数方法对物质的量, 特别是摩尔质量的影响很大。

2. 物质的量浓度 物质的量浓度 (molarity), 又称体积摩尔浓度, 也可以简称浓度。溶质 B 的物质的量浓度定义为溶质 B 的物质的量除以溶液的体积, 用符号  $c_B$  表示, 即:

$$c_B = \frac{n_B}{V} \quad (2-3)$$

式中,  $c_B$  为 B 的物质的量浓度;  $n_B$  为物质 B 的物质的量;  $V$  是溶液的体积。 $c_B$  的 SI 单位是  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ , 医学上常用的单位为  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

应该指出的是在使用物质的量浓度时, 必须指明物质的基本单元。如  $c(\frac{1}{2}\text{HCl}) = 1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $c(\text{Ca}^{2+}) = 3\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。物质的量浓度的单位  $\text{mol/L}$  在国际上通行的科学文献中, 通常简写为  $\text{M}$ 。使用物质的量浓度的方便之处是很容易通过体积量取准确的物质的量。当前的化学、生物和医学研究及实际应用中, 液体的体积操作是非常方便和精密的, 人们可以量取大到几升小到几纳升 ( $10^{-9}\text{L}$ ) 的溶液。因此, 物质的量浓度是最广泛应用的浓度。

由式 (2-1) 和式 (2-3), 物质 B 的质量浓度  $\rho_B$  与物质的量浓度  $c_B$  之间的关系为:

$$\rho_B = c_B M_B \quad (2-4)$$

**【例 2-3】** 每 100ml 正常人血浆中含  $326\text{mg Na}^+$ 、 $10\text{mg Ca}^{2+}$ 、 $164.7\text{mg HCO}_3^-$ , 计算它们的物质的量浓度各是多少?

$$\text{解: } c(\text{Na}^+) = \frac{0.326\text{g} \times 1000}{23.0\text{g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 0.1\text{L}} = 142\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$c(\text{Ca}^{2+}) = \frac{0.010\text{g} \times 1000}{40\text{g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 0.1\text{L}} = 2.5\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$c(\text{HCO}_3^-) = \frac{0.1647\text{g} \times 1000}{61.0\text{g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 0.1\text{L}} = 27.0\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

**【例 2-4】** 200ml 生理盐水中含  $1.8\text{g NaCl}$ , 计算生理盐水的质量浓度和物质的量浓度。

解: 生理盐水的质量浓度为:

$$\rho(\text{NaCl}) = \frac{m(\text{NaCl})}{V} = \frac{1.8\text{g}}{0.20\text{L}} = 9.0\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$$

$\text{NaCl}$  的摩尔质量为  $58.5\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 生理盐水的物质的量浓度为:

$$c(\text{NaCl}) = \frac{\rho(\text{NaCl})}{M(\text{NaCl})} = \frac{9.0\text{g} \cdot \text{L}^{-1}}{58.5\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 0.15\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

### 三、摩尔分数与质量摩尔浓度

1. 摩尔分数 摩尔分数 (mole fraction) 又称为物质的量分数或物质的量比。溶质 B 的摩尔分数定义为 B 的物质的量与混合物的物质的量之比, 用符号  $x_B$  表示, 即

$$x_B = \frac{n_B}{\sum n} \quad (2-5)$$

式中,  $n_B$  为 B 的物质的量;  $\sum n$  为混合物的物质的量。

如果溶液中只有溶质 B 和溶剂 A, 则:

$$x_B = \frac{n_B}{n_B + n_A}$$

$$x_A = 1 - x_B$$



摩尔分数单位为 1, 在物理化学推导中使用非常方便。

2. 质量摩尔浓度 溶质 B 的质量摩尔浓度 (molality) 定义为溶质 B 的物质的量除以溶剂的质量。用符号  $b_B$  表示, 即:

$$b_B = \frac{n_B}{m_A} \quad (2-6)$$

式中,  $n_B$  为溶质 B 的物质的量;  $m_A$  为溶剂 A 的质量。质量摩尔浓度的 SI 单位是  $\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在用称量法配制溶液时, 质量摩尔浓度显得非常方便。在研究简单溶液并且没有溶液混合等操作时, 质量摩尔浓度相当实用。许多物理化学常数都是用这种方式测定的。

**【例 2-5】** 在 200ml 水中溶解 0.54g KCl 晶体, 计算溶液中 KCl 的质量摩尔浓度。

解: KCl 的质量摩尔浓度为:

$$\begin{aligned} b(\text{KCl}) &= \frac{n(\text{KCl})}{m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{m(\text{KCl})}{M(\text{KCl})m(\text{H}_2\text{O})} \\ &= \frac{0.54\text{g}}{74.6\text{g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 0.20\text{kg}} = 0.036\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

在稀的水溶液中,  $c_B$ 、 $b_B$  和  $x_B$  三种浓度的转换关系为:

$$\begin{aligned} \{b_B\} &= \frac{n_B}{m_A} = \frac{n_B}{V_A \rho_A} = \frac{n_B}{V_A \cdot 1} \approx \frac{n_B}{V} = \{c_B\} \\ \{x_B\} &= \frac{n_B}{n_B + n_A} \approx \frac{n_B}{n_A} = \frac{n_B}{\left(\frac{m_A}{MW_A}\right)} = MW_A \frac{n_B}{m_A} = MW_A \cdot b_B = 0.018\{b_B\} \end{aligned}$$

注意: 上式中  $\rho_A$  是稀的水溶液近似为纯水的密度,  $m_A$  的单位是 kg, 相应的  $MW_A$  的单位是  $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

### 第三节 电解质溶液

电解质 (electrolytes) 是指在水溶液中或在熔融状态下能够导电的化合物。电解质种类繁多, 性质也不尽相同。按照在水溶液中解离程度的不同, 一般可分为强电解质和弱电解质两类。强酸、强碱及大部分盐类都是强电解质, 它们在水溶液中是完全解离的, 以水合离子形式存在, 具有较强的导电性。弱酸、弱碱和某些盐类 [如  $\text{Pb}(\text{Ac})_2$ ,  $\text{HgCl}_2$ ] 等都是弱电解质, 在水溶液中仅部分解离, 未解离的分子与解离产生的离子之间存在着解离平衡, 导电能力较弱。

#### 一、电解质在水中的溶解过程

电解质的溶解过程是一个复杂的过程。首先电解质在水中解离成阴、阳离子, 然后再与溶剂分子形成溶剂化阴、阳离子。因此, 电解质解离程度的强弱除与电解质本身性质有关外, 还与溶剂的性质有关。例如,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  在水中为弱电解质, 而在液  $\text{NH}_3$  中则全部解离, 属强电解质。

阿伦尼乌斯 (Arrhenius) 提出的电离理论认为, 当电解质在水中解离成阴、阳离子时, 由于水分子是极性分子, 两者便产生离子-偶极分子之间的作用: 阳离子与水分子的负极相互吸引, 阴离子与水分子的正极相互吸引。阴、阳离子与水分子之间的这种相互作用, 称为水合作用。水合作用使每个离子周围形成一个水合膜。所以电解质溶液中阴、阳离子并非是“裸露”的自由离子, 而是被水分子紧密包围着的水合离子。由于水的介电常数较高, 水合离子之间的相互吸引或排斥作用被大大减弱, 在极稀的溶液中可以忽略不计, 因此水合的阴、阳离子可以看作是一个个独立存在于水中的游离离子。由于参加水合的水分子数目并不固定, 所以在书写时仍以简单离子的符号表示, 如  $\text{H}^+$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  离子等 (图 2-1)。