

◎课·外·天·地·丛·书◎

之四

化·学·系·列

化学魔术探源

王钧 石平

山西教育出版社

中学生课外天地丛书

化学系列编委会

主 编 张嘉同

成 员 王德胜

鲍 鸥

曾国屏

前 言

你欣赏过高水平的魔术表演吗？当你看到魔术师手持长杆从人群中钓出了活蹦乱跳的鱼，看到帽子中飞出了一只只和平鸽，看到空箱中变出了活人或者从魔术师的手中变出了数不清的鲜花、扑克甚至钞票的时候，你会由衷地赞叹魔术师的精湛技艺，面对这种“无中生有”的变化感到不可思议，但隐约之中却总有一点遗憾。因为你尽管不知道这些“变”出来的东西原来藏在哪里，你却知道它们是早已存在的。一想到这里，它的“魔力”就大大地削弱了。

可你见过这样的“魔术”吗？乌黑的煤块变成了五颜六色的染料，从湛蓝的海水中变出了银光闪闪的合金，又粗又散的沙子变成透明的玻璃，滚滚的石油变成了各种塑料和布匹……这种魔术的神奇就在于它的真实和价值。可以说现代生活的衣食住行样样都离不开它。这个魔术就是形形色色的化学反应，而那些每天都在进行表演的魔术师就是伟大的化学家。

物质的变化，在地球上出现人类以前就已经存在着。雷电使空气中的氮气和氧气化合，又溶进雨水形成硝酸盐流入土壤；水缓慢地溶蚀地下石灰岩，使之变成美丽的地下宫殿……这些仅仅是自然的力量。但是，化学变化一旦被人类所掌握，就会创造出奇迹来。早在古代，人们就造出了瓷器、钢铁、纸张等自然界没有的东西，让它们为人类服务。今天科学技术的发展，更给化学家们提供了施展才能的条件。在他们手下，那神奇的魔术表演更加丰富多彩。通过化学反应，他们制出了各种药品，使人类的寿命得以延长；通过化学反应，他们制出油、

盐、酱、醋、味精等一系列调味品，使人们每天都能品尝美味佳肴；通过化学反应，人们合成出建筑高楼大厦的原材料、绚丽多彩的合成纤维、制造汽车轮胎的人造橡胶……这一切使我们人类的物质文明大大向前迈进了一步。所有这些都是化学家的功绩，是化学反应的结果。

化学和其他学科一样，从萌芽状态发展为成熟的科学，其中经历了无数次失败，甚至误入歧途。从古代炼金术开始，人们就试图通过化学反应“点石成金”。尽管这是一个错误的方向，但人类却从谬误中摸索出化学反应的规律，从而逐渐抛弃了带有迷信以及神秘色彩的东西，走上了研究化学反应的正确道路。

化学发展以后，化学家们开始对物质结构进行研究和探讨。他们发现这生机盎然的五彩世界其实只是由为数不多的100多种元素以不同方式结合而成的。这些元素就像儿童手中的建筑积木，经过不同的组合和插接就构成了这千变万化的物质世界。更重要的是，这些物质之间通过化学反应是能够相互转化的，通过这种转化就能不断地创造出大量的新物质来。化学家起先只在实验室中变这种“魔术”，后来又把它们搬上了大工业的舞台，让化学反应真正造福于人类。为此，人们更迫切地需要认识化学反应的内在规律以便指导生产实践。我们写这本书的目的就是要拉开“魔术表演”的大幕，让同学们跟随化学魔术师去观察各类不同化学反应的现象，并且透过这些现象了解它们的本质，从而掌握化学反应的变化规律。希望这本书能带着你们在化学反应的世界中做一次有趣的旅行。

• 目 录 • ~~~~~

一、化学反应七彩虹	(1)
打开酸碱反应的大门	(2)
奇妙的离子、分子反应	(22)
探寻氧化还原反应的实质	(35)
走出配位反应的迷宫	(71)
二、化学反应探秘	(86)
物质与能量	(87)
反应会发生吗	(94)
化学反应也有速度	(107)
化学反应的限度	(121)
结束语	(131)

化学反应七彩虹

走进化学反应的天地,你仿佛置身于神奇的魔宫。那形形色色的化学反应异彩纷呈,那光怪陆离的千变万化更令人迷醉。你喜爱节日升起的礼花吗?它们红的像牡丹,黄的像秋菊,白的像玉兰,绿的像翠竹……真是五彩缤纷,绚丽夺目,把节日的夜空装点得美丽、壮观。可你想过吗?这里边正发生着多少化学反应。化学反应数目之多、种类之繁正像这节日的礼花让你一下子难以理清,单就反应中的颜色变化就使你眼花缭乱。我们的化学魔术师也善于制造“七彩虹”般的颜色变幻,你看,他拿着一把“魔壶”走上舞台,要给我们表演一个有趣的变色魔术。

魔术师面前摆着4个透明的“空”玻璃杯,他手中“魔壶”中装着“白开水”。他提起壶,将“水”分别注入4个杯子中。稍一摇动,4只杯子中竟出现了四种颜色的“饮料”:白色的“牛奶”,黄色的“橙汁”,红色的“果茶”和黑色的浓“咖啡”。不过,你千万别去喝它们。因为,那“白开水”是硝酸银(AgNO_3)溶液,4只杯子中分别放入了少量的氯化钠(NaCl)、碘化钾(KI)、铬酸钾(K_2CrO_4)和硫化钠(Na_2S)晶体。硝酸银与它们相遇会生成4种沉淀:白色的氯化银(AgCl),黄色的碘化银(AgI),红色的铬酸银(Ag_2CrO_4)和黑色的硫化银(Ag_2S)。所

以溶液就出现了各种颜色。不知底细的人还真以为有一把会变饮料的魔壶呢。

有趣的魔术告诉我们,这些物质的颜色变化正是化学反应的结果。纷繁的化学反应就像一颗颗散乱的宝石,为了寻找它们的内在规律,化学家从微观的分子、原子、电子相互作用的角度对它们进行分类,串成若干条价值连城的珠宝项链,奉献给人类。有了它们,我们就能掌握化学反应的规律,让它们为人类服务。还是让魔术师引导我们,去探索各类化学反应的本质吧!

打开酸碱反应的大门

魔术表演的大幕拉开的时候,魔术师已手持喷雾器站在台上了。只见他举起喷雾器喷向一张白纸,“酸碱中和反应”6个大字跃然纸上。有趣的是,这6个字竟然有红、黄两种颜色。揭开这个谜并不困难。喷雾器中喷出的是一种酸碱指示剂,叫甲基橙。它遇酸变红,遇碱变黄。不用说,变黄的字是用稀碱液写的,而变红的字是用稀酸写的。是的,我们今天可以通过指示剂的变色来判断酸碱了,但人类对酸碱的认识却经历了一个漫长的过程。

人类对酸碱的认识

生活中经常接触酸和碱。可什么是酸,什么叫碱不是一下子就能说清的。人类对酸碱的认识过程是一个由浅入深、由低级到高级的过程。

最初,人们是通过物质的某些性质来区分酸碱的。认为有

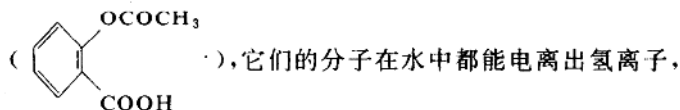
酸味的东西就是酸。醋是酸的,桔子、酸牛奶也是酸的。现在我们知道了,醋中含有醋酸,桔子中有柠檬酸,酸牛奶中有乳酸。这些酸的酸性较弱,又没有毒,不会伤害我们,所以你可以用嘴去尝。可有些酸的酸性极强,像盐酸、硫酸、硝酸这样的腐蚀性强酸,躲还唯恐不及,谁还敢去尝它。即便是弱酸也有许多是不能尝的,像氢氰酸(HCN)、砷酸(H_3AsO_4)等,误食少量就会中毒,严重的还会危及生命。即使是可以品尝的酸也并非都有酸味。做肥皂的硬脂酸,样子像蜡,尝起来淡而无味。做炸药、染料的苦味酸味道极苦,并且有毒。水杨酸的味道是甜的,它是一种防腐剂,化学浆糊中就常掺入它,可以抑制霉菌生长。所以,用品尝的方法是无法准确对酸作出判断的。至于碱呢,一般认为它是苦的。我们吃的一些胃药中就含有氢氧化镁或氢氧化铝,这样的弱碱,尝一尝又苦又涩。如果用手触摸,碱有滑腻之感。可惜,能用嘴尝、用手触摸的酸碱实在太少了,大部分酸碱都有腐蚀性,别说不能入口,就是溅到身上也会烧坏你的皮肤。

后来,人们发现了酸碱指示剂,就通过指示剂的颜色变化来判断酸碱。比如,能使蓝色石蕊试纸变红的溶液是酸,能使红色石蕊试纸变蓝的溶液是碱。可这也只是对酸碱的一种表面认识。随着生产和科学的发展,人们迫切感到必须建立完整的酸碱理论。

1887年,瑞典年轻的化学家阿仑尼乌斯提出了著名的酸碱电离理论。他认为,许多物质在水溶液中会电离出正负离子。那么,在水溶液中能电离出氢离子(H^+)的物质就定义为酸,能电离出氢氧根离子(OH^-)的物质就定义为碱。

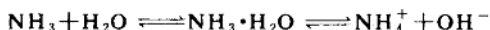
比如人的胃液里含有盐酸,维生素C又称抗坏血酸,常

用的解热镇痛药阿斯匹林(A. P. C)的学名就叫做乙酰水杨酸



所以,它们都是酸。但不同的酸在水中电离的程度却大不相同。同样浓度的酸,电离出的氢离子越多,也就是电离度越大,它的酸性就越强。盐酸在水中能 100% 电离,就称为强酸。醋酸(CH_3COOH)的电离度就小多了,每升含 0.1 摩尔醋酸的水溶液中,电离出的氢离子浓度仅为醋酸浓度的 1.33%,所以醋酸是弱酸。而维生素 C 和阿斯匹林在水中电离出的 H^+ 的百分比更少,它们的酸性更弱。

我们生活中能遇到的碱也不少,氨就是一种。氨在水中能电离出少量的氢氧根离子,所以这是一种弱碱:

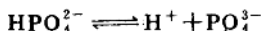
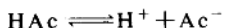


氨也叫阿摩尼亚,它具有强烈的刺激性气味。人被蚊虫叮咬后,涂上一点稀氨水,可以止痒。常用来粉刷墙壁的石灰水 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$,制肥皂用的烧碱(NaOH),在水中都是 100% 电离,所以它们是强碱。

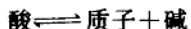
阿氏的酸碱电离理论是现代电离理论的开端,是人们对酸碱的认识由现象到本质的一次飞跃。这一理论对化学学科的发展起了积极促进的作用,直到今天仍在普遍使用着。但这一理论仅对水溶液中的反应实用,并且对某些不含氢离子或氢氧根离子的酸碱物质的归属解释不清,尤其是在使用其他非水溶剂时,酸碱的定义就不够明确了。

1923 年,丹麦的布朗斯特和美国的劳莱提出了酸碱质子理论,将酸碱的概念进一步扩大了。质子其实就是氢离子

(H^+), 氢失去电子后原子核只剩下一个质子。酸碱质子理论认为: 凡能给出质子的物质都是酸, 凡能接受质子的物质都是碱。这个定义把电离理论的定义包括在内而与溶剂无关, 并将电离一词改为解离, 其意义和范围就更为广泛。例如醋酸 (HAc)、铵离子 (NH_4^+) 和磷酸氢根离子 (HPO_4^{2-}) 等都可以给出质子:

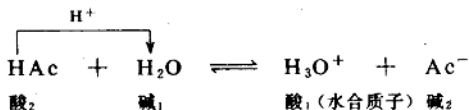


所以, 它们都是酸。而解离出质子后的醋酸根 (Ac^-)、氨分子 (NH_3) 和磷酸根 (PO_4^{3-}) 都可以接受质子, 所以它们都是碱。酸和碱不是彼此独立的, 它们之间存在着如下关系:

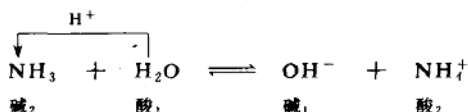


这种以质子接受关系联系起来的酸和碱, 称为共轭酸碱对。不难看出, 醋酸和醋酸根就是一对共轭酸碱对, NH_4^+ 与 NH_3 之间, HPO_4^{2-} 与 PO_4^{3-} 之间同样如此。

由此可见, 质子论不是从组成上区分酸碱, 而是看这种物质 (分子或离子) 在反应中对 H^+ 的接受关系。有些物质跟一些物质反应时是酸, 与另一些物质作用时就是碱。水就是这样的物质。水与醋酸作用时, 由于醋酸给出质子的能力比它强, 它就接受质子为碱, 而水合质子就是它的共轭酸:



但当水遇到得质子能力较强的氨时, 水就给出质子成了酸, 而失去质子后的氢氧根就是它的共轭碱:



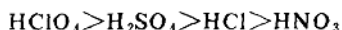
所以你看,不管是分子还是离子,也不管在水中还是其他溶剂中,只要能把质子给出来的物质就是酸,而能够得到质子的物质就是碱了。

酸碱强弱的比较

给你几种酸:盐酸、硝酸、醋酸和氢氰酸,浓度都为 0.1 摩/升。我们可以用 pH 试纸去测试它们的酸性。盐酸、硝酸使 pH 试纸显红色,和比色板对比一下, pH 值为 1。醋酸使 pH 试纸显黄色, pH 值接近于 5。氢氰酸的 pH 值就近乎中性了。这样看来,硝酸、盐酸是强酸,醋酸的酸性较弱,而氢氰酸的酸性就更弱了。你的判断完全正确,因为电离理论认为,同一浓度的酸,在水溶液中电离出的氢离子越多,其酸性就越强。但这仅限于水做溶剂的情况,若是换了其他溶剂,电离理论就无法说明了。

质子理论认为酸碱的强弱是相对于溶剂而言的。举个例子,将高氯酸(HClO_4)、硫酸(H_2SO_4)、盐酸(HCl)、硝酸(HNO_3)配成相同浓度的水溶液,它们的酸性强弱是相同的。因为水接受质子的能力较强,在水中,这 4 种酸都会毫无保留地将它们的质子全部转移给水。因此,在水中它们都是强酸,分不出谁是“强中之强”。要是我们把溶剂换成冰醋酸(HAc),情况就不同了。冰醋酸接受质子的能力比水要弱得多,因此这 4 种酸在给出质子时就有了差别。也就是说,它们给出质子的能力大小被冰醋酸检验出来了。当然,它们酸性强弱的顺序也

就排出来了：



打个比方，这4种酸好像四名摔跤健将。它们先与一个实力极弱的对手——水进行摔跤比赛。结果，四位选手不费吹灰之力就将水打败，把所有的 H^+ 都强加给水了。后来换上实力强点的冰醋酸做对手，四位健将的实力大小就会有所体现。我们可以通过每位健将与醋酸较量的成绩好坏来区分它们的强弱。这个例子告诉我们，酸碱的强弱与溶剂的性质是相关的。

即使是同一物质，在不同溶剂中所表现出的酸碱性也会大不相同。就拿我们最熟悉的醋酸来说，它在水中是地地道道的弱酸，因为它无法把质子全部转移给水。但在乙二胺（ $\text{NH}_2\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—NH}_2$ ）中就不一样了。由于乙二胺接受质子能力较强，醋酸就把所有的质子都转移给了乙二胺，于是它就理直气壮地称自己为强酸。在与乙二胺的较量中，醋酸与硝酸、盐酸、硫酸站在了同一领奖台上，因为它们都能把质子全部转移给乙二胺。是乙二胺把这几种酸的水平拉到了同一高度。自然界中具有相对性的事物太多了。摩天大楼面对低矮的平房夸耀自己的高大，可与喜马拉雅山相比却成了矮小的侏儒。这样，你就不难理解酸碱强弱的相对性了吧。

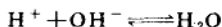
酸碱中和与质子传递

化学魔术师又来到舞台上，这回为你表演一个“红白酒互变”的小魔术。只见他拿出两个一模一样的透明酒瓶，里面都盛着“白酒”，只是一瓶酒多，一瓶酒少。魔术师拿起盛“酒”较多的那个瓶子，向“酒”少的瓶子中倒进了一半“白酒”。咦，“白酒”变成“红酒”了。魔术师把剩下的一半“白酒”一古脑都倒进

“红酒”里，奇怪，“红酒”不但没有变得更红，反而又变成“白酒”了。

戳穿这个魔术的底细并不难：“酒”多的瓶子里装的是稀盐酸，里面加入了酚酞，酚酞遇酸呈无色透明状。“酒”少的瓶子里放着与盐酸同浓度的氢氧化钠溶液。第一次，往碱中倒入一些酸，由于碱过量，溶液呈碱性。酚酞遇碱变为红色。第二次把酸全部倒入碱液中，酸一过量，红色自然就消失了。这个魔术的原理其实就是我们极熟悉的酸碱中和反应，要是换成硝酸和氢氧化钾效果也是一样的。这就说明，任何酸和碱进行的中和反应，其本质都相同。

人们经过研究发现，强酸、强碱在发生中和反应时，如果它们的量相同，产生的热也相同。阿仑尼乌斯对酸碱反应实质的描述刚好能证明这一点。阿氏认为，中和反应的实质就是氢离子与氢氧根离子结合生成水的反应。即：



当然它仅限于水溶液中的反应。

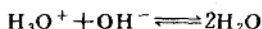
酸碱质子理论对中和反应的解释似乎比阿氏理论有更大的优越性。该理论认为酸碱反应的实质是质子转移的反应。我们先来看看它是如何解释醋酸与氨水在水溶液中的反应的。醋酸的酸性比水强，自然会把质子转移给水。



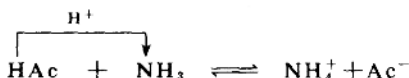
而水的酸性又比氨水强，它就会把质子转移给氨使其变成铵根：



此时,得到质子的水变成了水合质子,失去质子的水变成氢氧根,它们俩结合又变成了水:



我们把这两个式子写到一起就成为:



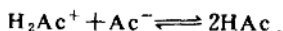
不难看出,水并没有参加反应,它只起了传递质子的作用。这里,水就像排球场上的二传手,把球从一传那儿传给了主攻手。不过,二传手的责任却相当重大,传球水平的高低将会决定最终进攻的效果。较强的酸碱发生反应,水是较好的“二传手”。但如果遇到一个碱性极弱的碱(用字母 B 表示),它在水中接受质子的能力很小,这个中和反应就很难进行得完全。此时最好的办法就是换一个“二传手”。假如换成冰醋酸做溶剂,冰醋酸的酸性比水强,弱碱溶在其中就等于提高了碱性,即接受质子的能力大大增强了,就好像二传手给它传了一个极好的球一样:



要想让中和反应进行得完全彻底,可以采用一种强酸如高氯酸来与 B 反应。高氯酸比醋酸的酸性强,它把质子转移给醋酸:



此时,醋酸完成任务,又回到原来的状态:



B 与高氯酸的反应为：



反应完成得很彻底。反应中，醋酸也只起了传递质子的作用。所以我们说，酸碱中和反应是质子传递反应。

紫罗兰变色与酸碱指示剂

我们在实验室中常常要用酸碱指示剂来鉴定溶液的酸碱性，这已是判断酸碱的一种最普通、最简单的方法了。可你知道酸碱指示剂是从哪儿得到的吗？说来饶有趣味，最早的酸碱指示剂竟是从鲜花中提取的。

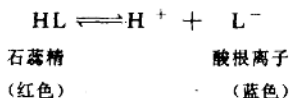
最先观察到鲜花在酸碱中呈现不同的颜色并发明酸碱指示剂的人叫罗伯特·波义耳。

波义耳是 17 世纪英国的物理学家和化学家，一生建树颇丰。有一次，他在实验室放了一束紫罗兰花。当他把盐酸倒入烧杯时，不慎酸沫溅到了花瓣上。一个意想不到的现象出现了：紫色的花瓣竟出现了红色的斑点！波义耳没有放过这一发现。经过仔细研究，他发现紫罗兰花在酸中变红，在碱中会变蓝。他又用了许多植物的花、茎、叶的浸出液做实验，证明它们大多数都具有遇酸、碱改变颜色的性质，其中最明显的便是地衣类植物石蕊的浸出液。于是，石蕊便成了最早的酸碱指示剂。为了使用方便，波义耳用白纸在石蕊浸出液中浸泡，晾干备用就做成了石蕊试纸。至今我们仍在使用它。

随着化学学科的发展，人们又用合成的方法制出了许多新的酸碱指示剂。现在，它们已经是一个大家庭了：石蕊、酚酞、甲基橙、甲基红、百里酚蓝……

酸碱指示剂为什么能够在酸碱中呈现不同的颜色呢？原来，一般的酸碱指示剂本身就是弱的有机酸或弱的有机碱，当溶液的酸碱性发生变化时，指示剂的结构也相应地改变，这就引起了颜色的变化。

例如，石蕊中含有石蕊精($C_7H_7O_2N$)，这是一种弱的有机酸，在水溶液中会发生电离，产生蓝色的酸根离子：



在中性溶液里，红色的石蕊精分子和蓝色的酸根离子同时存在，溶液显紫色；在酸性溶液里，大量的氢离子和酸根离子结合，形成石蕊精分子，溶液显红色；在碱性溶液里，碱电离出的 OH^- 会中和掉溶液中的 H^+ ，使酸根离子多于石蕊精分子，溶液就显蓝色。所以，当溶液的酸碱性发生变化时，酸碱指示剂也会随之改变颜色。在工业生产和科学实验中，人们需要随时了解和控制溶液的酸碱度，这就要用到各种酸碱指示剂了。

不同的指示剂变色范围是不同的。比如酚酞是在 $\text{pH}=8\sim 10$ 这个范围内，从无色变为粉色，然后变成红色。而甲基橙的变色范围是 $\text{pH}=3.1\sim 4.4$ ，是在酸性范围， $\text{pH}<3.1$ 时，它是红颜色，而当 $\text{pH}>4.4$ 时为黄色，在 $\text{pH}=3.1\sim 4.4$ 这个范围内，它是红、黄两色的混合色——橙色，也称为过渡色。所以选择指示剂应适合，不然就不能发挥它的效力了。这里边的学问还不少呢。

酸碱中的“两面派”

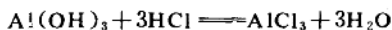
让我们再来变一个小魔术。在一杯“清水”中加入一些氨

水，立刻出现了白色的“牛奶”。你把“牛奶”分成两份，一份中加入盐酸，另一份中加入氢氧化钠溶液，两杯“牛奶”又都变成了“清水”。

实际上，我们第一次用的“清水”，是三氯化铝溶液，加入氨水后生成氢氧化铝白色沉淀。这种白色的絮状沉淀远看就像牛奶：



氢氧化铝是一种两性物质。当遇到强酸时，它就会呈碱性，因此加入盐酸后“牛奶”变成了“清水”：



当氢氧化铝遇到强碱时又呈现出酸性，生成可溶性的偏铝酸盐，所以加入氢氧化钠后，“牛奶”也变成了“清水”：



氢氧化铝是个地地道道的“两面派”，我们叫它两性氢氧化物，像它这样的酸碱也还有一些。为什么在酸碱队伍中，有的酸碱“立场坚定”，而有的酸碱却“左右摇摆”呢？这就要从它们自身的“素质”——分子结构上寻找原因了。

我们先来看碱的结构。任何一个碱都是一个带正价的原子与氢—氧结合。例如，氢氧化钠可以写成 $\text{Na}-\text{O}-\text{H}$ ，氢氧化镁可以写成 $\text{H}-\text{O}-\text{Mg}-\text{O}-\text{H}$ 。再看看酸的结构，我们总是习惯把酸的氢离子提到前面，其实它的结构与碱是一样的。



例如硼酸(H_3BO_3)的结构可以写成： $\text{H}-\text{O}-\text{B}-\text{O}-\text{H}$ ，而硫酸可以看成是S与6个 $-\text{O}-\text{H}$ 相连，但由于脱掉了两分