

# 溴

## ——变局之关键资源

□ 文图 / 孔维刚 王登红 刘喜方

**第一作者简介** 孔维刚，副研究员，主要从事行星矿物学、行星地球化学研究工作。

溴素主要形成于大质量恒星后期塌缩产生的超新星爆发过程中。因溴原子核中的质子数为奇数，受奇偶规则约束，溴的宇宙丰度相对较低，仅为 7 ppb，地球的溴元素丰度相对富集，约为 3 ppm。

常压下溴单质的熔点为 $-7.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，沸点为 $59.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，因此在常温常压下溴单质为液体，是唯一的液态非金属元素。溴属于卤族元素，因其电负性强，自然

界中溴主要以离子形式存在，其离子半径为 $1.96\text{ \AA}$ 。

因离子半径大，溴离子难溶于硅质岩石中，常以液相或气相富集，属于高度挥发分。在地球演化早期，随着地核与硅质地球的分异，大量溴被封存于地核中。随着地球的进一步演化，硅质地球通过脱气作用把大部分溴“挤”出地幔，排到地壳。

### 沧海桑田

脱气作用给地球表面提供了大量的溴。因不溶于硅酸盐，地球仅有少量稀有矿物含溴，如溴银矿、氯溴银矿等，因而陆地不能容纳较多的溴。历经沧桑，



> 火山脱气作用（印尼罗肯火山）

溴最终在地表最大的水体海洋中富集。海洋中溴含量约是陆地中的 70 倍，因此地球表面富溴的水体几乎都与海水有着千丝万缕的联系。世界著名的死海，其溴含量是陆地的 5 000 倍，由近代海水在裂谷环境中蒸发浓缩形成。在美国最大的溴素生产基地，阿肯色州墨西哥湾盆地中，Smackover 组地下卤水溴含量是陆地的 1 000 ~ 7 000 倍，主要源于两亿年前古海水蒸发浓缩。

我国国土幅员辽阔，历经沧桑，曾有大部分被海洋覆盖。到晚三叠世，我国国土大部分都从海洋隆升为陆地，这一抬升过程中沉积的巨厚海相地层保存了大量的海水物质，其中也包括溴。随着海水的退却，我国沉积地层中海相比例减少，陆相比例增加，存留的海水溴也随之减少。

我国几个典型海相盆地，如四川盆地、鄂尔多斯盆地、羌塘盆地、江汉盆地等都历经沧桑，其海相地层保留的溴都有相应显示。例如：四川盆地海相碳酸盐储层的“浓缩古海水”中溴含量最高达到陆地的 2 000 多倍；鄂尔多斯海相地层“浓缩古海水”中溴最高为陆地的 5 000 多倍。

与之形成鲜明对照的是我国几个典型陆相盆地。因为没有继承海相物质，陆相盆地整体溴含量相对较低。例如：柴达木盆地第四纪盐湖、第三系油田水中溴含量只有四川盆地地下卤水的几十分之一；塔里木盆地和江汉盆地陆相地层中卤水溴含量也比四川盆地低很多。

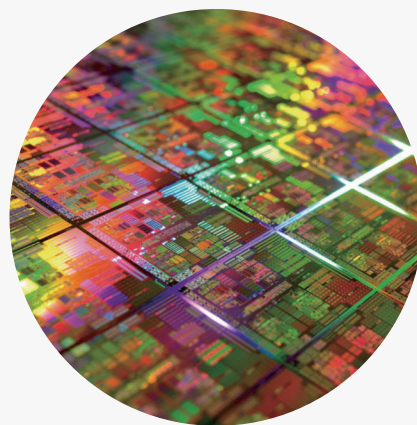
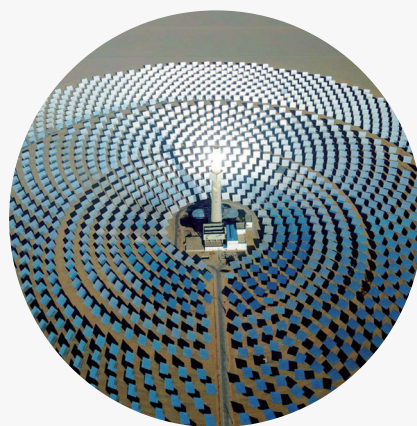
可以说，溴见证了我国国土从海底隆升为陆地的地质历史。沧海桑田，百年巨变，持续发展的溴产业，还将继续见证我国的再次崛起、中华民族的伟大复兴。

## 变局之关键资源

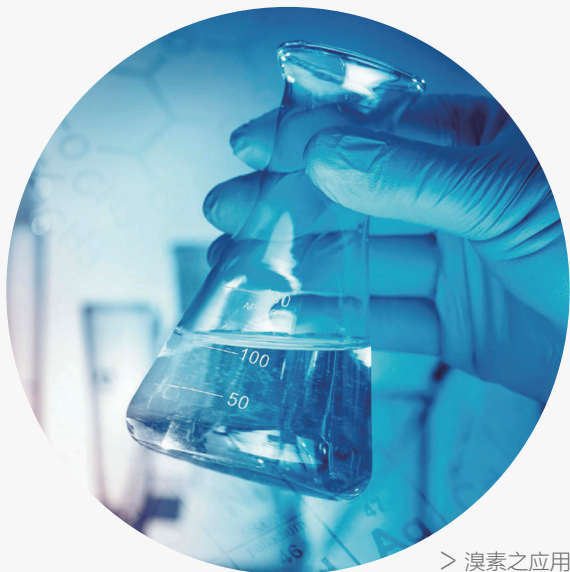
溴素的主要应用领域包括精细化工、高端制造、环保、石化、医药、储能等，相关高附加值产品超过百种，是完备工业体系的必要资源。全球范围内，溴消耗量从大到小的国家和地区依次为以色列、美国、中国、印度、西欧和日本等，可以说溴素的产业消耗量是反映高端产业强大的重要指标。

2009 年以来，全球主要国家在环保方面对溴化工产品的要求有了新的提高，然而企业研发推出了更多环境友好、高附加值的溴基工业产品，致使全球溴素消耗量不降反增，由 2008 年的不到 60 万吨增加到 2019 年的约 80 万吨。

依靠优势溴资源基地的死海、中东地区自 20 世纪初就开始发展提溴及相关产业。以色列建国后，依托死海的溴化工产业逐步变大变强，到目前为止，以色列化工集团和美国雅宝集团在死



> 溴素之应用



> 溴素之应用

海地区布局了超过四成的全球溴产能。除溴素生产外，以色列在溴素产业下游也布局了完整的产业链，分别在其本国、荷兰和美国建厂生产高附加值的溴基产品。以色列在本土主要生产溴化工消费品和部分中间工业品，在荷兰主要生产精细化工产品 and 定制产品，在美国主要生产水净化相关产品。

美国自 20 世纪 50 年代开始利用墨西哥湾盆地的地下卤水提溴，并发展相关产业。至今，美国的雅宝集团和科聚亚集团在美国阿肯色州依托地下卤水布局了全球约四成的溴产能。目前这两家公司的下游产品主要包括阻燃剂、高端油田钻井液、医药及医药中间体、煤烟除汞药剂、高端清洗剂、水处理药剂、溴基食品灭菌剂等产品。据统计，美国 2006 年溴的消耗量超过 27 万吨，占当年全球消耗量 4 成。

当前我国溴素生产主要依赖沿海地下卤水，少量产自海水制盐尾卤，围绕这些资源区形成了较完备的溴素产业链，近年来在环保和产业升级方面也取得了较大进步。然而，沿海地区溴素资源面临品位下降、资源枯竭的困境，导致我国溴素进口量价齐涨。2013—2019 年，我国溴素进口量由 3 万吨增加到 6 ~ 8 万吨，进口价格由约 1.5 万元/吨增加到约 3 万元/吨。价格的大幅增长、进口依赖将要过半的现状，给我国溴化工企业造成了很多不确定性，严重威胁我国溴产业链的安全。已有企业正在非洲寻求新的溴素资源基地，对应的溴下游产业也有转移的趋势，不利于实现我国把高端制造业纳入核心竞争力的战略，亟需在国内建立新的溴资源和产业基地。

新中国成立后，由地矿系统主导，我国科研工作者在四川盆地持续开展了地下卤水勘探研究工作，在四川盆地多个地区、多个层位发现了富溴卤水，曾年产溴素高达 1 000 吨。据已有勘查资料估算，四川盆地仅个别勘查程度高的地区溴素远景资源量就超过 50 万吨，整个盆地有多个优质的溴素潜在资源区，远景资源量至少可以满足我国战略需求数十年。因此，有必要论证四川盆地作为战略溴资源和产业基地的可行性。此外，作为最大的海相盆地之一，鄂尔多斯盆地存留了大量的“海水物质”，可作为溴素资源储备基地，应加大溴资源勘查力度。

如果说稀土是工业味精，那么溴素就是工业蚝油，

是支撑我国产业升级，直面百年变局的关键资源。纵观全球，化工强国是工业强国的必要条件，因溴元素的特殊化学性质，溴基定制化工产业能够在一定程度反应一个国家的精细化工水平，我国石油石化系统、无机盐产业协会等单位在溴基化工领域已经有不少成果，也将在溴基定制化工领域取得更大突破。随着我国逐渐进入老龄化，制药行业将进一步发展，而溴基中间体的需求必将继续增加。我国地质调查工作者应发扬自力更生、艰苦奋斗的精神，保障我国关键时期的关键资源安全。📍

本文由国家重点研发计划“锂能源金属矿产基地深部探测技术示范之重点盐矿锂能源金属矿产基地深部探测技术示范（编号：2017YFC0602704）”课题资助。

---

第一作者单位 / 中国地质科学院矿产资源研究所

---

（本文编辑：王依卓）

