

# 第一章 全球锂矿资源成矿规律与分布

锂作为一种重要的能源金属，在高性能锂电池、受控热核反应中的应用使锂成为解决人类长期能源供给的重要原料。从全球来看，锂矿资源极其丰富，但分布不均，主要集中在南美洲的“锂三角”地区以及中国和澳大利亚。目前超过 60% 的锂矿资源尚未得到勘探开发，潜在资源量巨大。

据锂矿资源的赋存状态，全球锂矿床可划分为 3 种类型：盐湖卤水型、伟晶岩型和沉积型。盐湖卤水型锂矿床储量占全球总储量的 80% 以上，从经济价值和可采程度看，其重要性大于后两者；而沉积型锂矿床为 21 世纪初勘查的新发现，矿床储量可观，开采成本低廉，为全球锂矿床勘查开发提供了新的方向。

## 第一节 锂资源性质

### 一、天然锂元素的赋存状态与应用

锂 (Li) 是由瑞典科学家阿尔费德松 (J.A.Arffvedson) 于 1817 年在分析研究透锂长石时首次发现的。锂是自然界中最轻的金属，原子序数为 3，原子质量为 6.94，密度为  $0.534\text{g/cm}^3$ ，硬度 0.6，熔点  $180^\circ\text{C}$ ，沸点  $1347^\circ\text{C}$ 。其化学性质很活泼，在氧和空气中能自燃，在自然界仅以化合物形式存在。温度高于  $-117^\circ\text{C}$  时，氧化锂是典型的体心立方结构，但当温度降至  $-201^\circ\text{C}$  时，开始转变为面心立方结构。在  $20^\circ\text{C}$  时，锂的晶胞参数为  $0.35\text{nm}$ ，电导率约为银的  $1/6$ 。

锂作为稀碱元素之一，具有一些特殊的地球化学性质：①锂离子具有与镁离子 ( $\approx 0.57 \times 10^{-10}\text{m}$ ) 相近的离子半径 ( $\approx 0.59 \times 10^{-10}\text{m}$ )，因此，在矿物晶体结构中  $\text{Li}^+$  经常以类质同象的方式取代  $\text{Mg}^{2+}$ ；②锂在地幔部分熔融和岩浆结晶过程中为中等不相容元素 (卿德林等, 2011)；能够在地幔和地壳中广泛分布，地幔丰度为  $1.4 \times 10^{-6}$ ，地壳丰度为  $12 \times 10^{-6}$ ，在上地壳丰度高达  $20 \times 10^{-6}$ ，地球表层是锂的相对富集区；③在超基性岩中，锂的含量在  $10 \times 10^{-6}$

以下, Mg/Li 比值平均为  $52 \times 10^4$ , 但在酸性岩中锂的含量增加到  $40 \times 10^{-6}$ , Mg/Li 比值骤降至 140 (James et al.,2000), 因此锂主要在岩浆作用晚期富集, 自然界的赋锂矿物主要产自花岗岩; ④在沉积岩中, 锂含量在  $(17 \sim 207) \times 10^{-6}$  之间变化, 平均为  $66 \times 10^{-6}$ , 主要的赋锂矿物为锂蒙脱石; ⑤自然界水体中锂的含量较低, 海洋中仅为  $0.2 \times 10^{-6}$ , 河水和淡水湖泊中则在  $0.01 \times 10^{-6}$  以下 (赵葵东等, 2011; Chan et al.,2002)。

在自然界中目前已发现锂矿物和含锂矿物有 150 多种, 其中已定名的主要锂矿物有 37 种 (表 1-1)。现今世界上开采应用最多的锂矿物是锂辉石 (含  $\text{Li}_2\text{O}$  5.8% ~ 8.1%)、锂云母 (含  $\text{Li}_2\text{O}$  3.2% ~ 6.45%) 和透锂长石 (含  $\text{Li}_2\text{O}$  2.9% ~ 4.8%) 等 (李胜荣等, 2005)。

锂辉石 ( $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ): 链状硅酸盐矿物, 单斜晶系, 常呈短柱状、板状产出, 也见有粒状致密块体或粒状、短柱状集合体。颜色呈灰白色、绿色、暗绿色或黄色; 玻璃光泽, 半透明到不透明, 摩氏硬度为 6.5 ~ 7, {110} 完全解理, 夹角  $87^\circ$ , 密度为  $3.03 \sim 3.22\text{g}/\text{cm}^3$ , 是目前世界上开采利用的主要锂矿物之一。

锂云母 ( $\text{K} \{(\text{Li}, \text{Al})_3[(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}](\text{F}, \text{OH})_2\}$ ): 层状硅酸盐矿物, 单斜晶系, 是一种稀有的云母, 常呈片状、细小鳞片状集合体。颜色常呈玫瑰色、浅紫色, 含 Mn 时呈桃红色, 风化后呈暗褐色; 透明, 玻璃光泽, 解理面呈珍珠光泽, 摩氏硬度为 2 ~ 3, {001} 极完全解理, 密度为  $2.9\text{g}/\text{cm}^3$ 。中国江西宜春锂、铷、铯多金属矿床是世界上最大的伴生锂云母矿床, 也是我国正在开采利用的主要锂资源之一。

透锂长石 ( $\text{Li}[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$ ): 架状硅酸盐矿物, 单斜晶系, 通常呈块状, 玻璃光泽, 解理面呈珍珠光泽。颜色呈白色或黄色, 偶见粉红色, 摩氏硬度为 6 ~ 6.5, {001} 完全解理, 密度为  $2.3 \sim 2.5\text{g}/\text{cm}^3$ , 性脆。外观与石英相似,  $700^\circ\text{C}$  时转变为高温型锂辉石。主要产于花岗伟晶岩中, 与锂辉石、铯榴石、彩色电气石等共生, 津巴布韦的比基塔矿床是目前世界上最大的透锂长石矿床。

锂蒙脱石 ( $\text{Na}_{0.3}\{(\text{Mg}, \text{Li})_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{F}, \text{OH})_2\}$ ): 层状硅酸盐类黏土矿物, 单斜晶系, 白色, 摩氏硬度为 2 ~ 2.5, {001} 完全解理, 密度为  $2 \sim 2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。具有极强的吸附力及阳离子交换性能, 通常为海底沉积的火山灰分解后的产物。

表1-1 自然界主要锂矿物及其分类

| 序号 | 矿物    | 英文          | 化学式                                                                                                        | 矿物亚类/族    |
|----|-------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1  | 磷铝锂石  | amblygonite | $(\text{Li}, \text{Na})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{F}, \text{OH})$                                        | 架状磷酸盐磷铝石族 |
| 2  | 磷铝钙锂石 | bertossaite | $(\text{Li}, \text{Na})_2(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_4(\text{PO}_4)_4(\text{OH}, \text{F})$ | 架状磷酸盐磷铝石族 |
| 3  | 硅锂铝石  | bikitaite   | $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$                                                       | 架状硅酸盐沸石族  |

续表

| 序号 | 矿物          | 英文                | 化学式                                                                                                                         | 矿物亚类/族      |
|----|-------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 4  | 锂铍脆云母       | bityite           | $\text{Ca}(\text{Al}, \text{Li})_2[(\text{Al}, \text{Be})_2\text{Si}_2(\text{O}, \text{OH})_{10}] \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 层状硅酸盐云母族    |
| 5  | 锡锂大隅石       | brannockite       | $(\text{Na}, \text{K})_2\text{Li}_3\text{Sn}_2[\text{Si}_{12}\text{O}_{30}]$                                                | 架状硅酸盐       |
| 6  | 含硼绿泥石       | chlorite          | $\text{Li}_2\text{Al}_3\text{BSi}_2\text{O}_{14} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$                                                 | 层状硅酸盐, 绿泥石族 |
| 7  | 锂绿泥石        | cookeite          | $(\text{Al}_2\text{Li})\text{Al}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$                                                | 层状硅酸盐绿泥石族   |
| 8  | 锂冰晶石        | cryolithionite    | $\text{Li}_3\text{Na}_3[\text{AlF}_6]_2$                                                                                    | —           |
| 9  | 镁铝钠闪石       | eckermannite      | $\text{Na}_3(\text{Mg}, \text{Li})_4(\text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{F})_2$                  | 链状硅酸盐角闪石族   |
| 10 | 锂电气石        | elbaite           | $\text{Na}_3(\text{Li}, \text{Al})_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH}, \text{F})$                     | 环状硅酸盐电气石族   |
| 11 | 钠珍珠云母       | ephesite          | $\text{Na}(\text{Li}, \text{Al}_2)(\text{Al}_2\text{Si}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$                                       | 层状硅酸盐云母族    |
| 12 | 锂霞石         | eucryptite        | $\text{LiAlSiO}_4$                                                                                                          | 架状硅酸盐似长石族   |
| 13 | 锂蒙脱石        | hectorite         | $\text{Na}_{0.3}(\text{Mg}, \text{Li})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$                                      | 层状硅酸盐蒙脱石族   |
| 14 | 锂蓝闪石        | holmquistite      | $\text{Li}_2(\text{Mn}, \text{Fe}^{2+})_3(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$                | 链状硅酸盐, 角闪石族 |
| 15 | 香花石         | hsianghualite     | $\text{Ca}_3\text{Li}_2\text{Be}_3(\text{SiO}_4)_3\text{F}_2$                                                               | 架状硅酸盐沸石族    |
| 16 | 贾达尔石        | jadarite          | $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$                                                                                     | —           |
| 17 | 锂云母         | lepidolite        | $\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$                              | 层状硅酸盐云母族    |
| 18 | 锂铍石         | liberite          | $\text{Li}_2\text{BeSiO}_4$                                                                                                 | 岛状硅酸盐       |
| 19 | 钙锂电气石       | liddicoatite      | $\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$                                                                           | 环状硅酸盐, 电气石族 |
| 20 | 磷锰锂矿        | lithiophilite     | $\text{Li}(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})\text{PO}_4$                                                                      | 架状磷酸盐       |
| 21 | 锂硬锰矿        | lithiophorite     | $(\text{Al}, \text{Li})\text{MnO}_2(\text{OH})_2$                                                                           | —           |
| 22 | 块磷锂矿        | lithiophosphate   | $\text{Li}_3\text{PO}_4$                                                                                                    | 架状磷酸盐       |
| 23 | 锂硼绿泥石       | manandonite       | $\text{LiAl}_4(\text{AlBSi}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_3$                                                                   | 层状硅酸盐绿泥石族   |
| 24 | 羟磷铝锂石       | montebrasite      | $(\text{Li}, \text{Na})_2\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{OH}, \text{F})$                                                       | 架状磷酸盐磷铝石族   |
| 25 | 硅锰钠锂石       | nambulite         | $\text{LiNaMn}_4\text{Si}_5\text{O}_{14}(\text{OH})$                                                                        | —           |
| 26 | 羟磷铝钠石, 钠磷铝石 | natromontebrasite | $(\text{Na}, \text{Li}) \text{Al}(\text{PO}_4)(\text{OH}, \text{F})$                                                        | 架状磷酸盐磷铝石族   |
| 27 | 柱磷铈锂矿       | palermoite        | $(\text{Li}, \text{Na})_2(\text{Sr}, \text{Ca})\text{Al}_4(\text{PO}_4)(\text{OH}, \text{F})$                               | 架状磷酸盐       |
| 28 | 透锂长石        | petalite          | $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$                                                                                              | 架状硅酸盐长石族    |

续表

| 序号 | 矿物    | 英文              | 化学式                                                                                                                                  | 矿物亚类/族    |
|----|-------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 29 | 多硅锂云母 | polyolithionite | $\text{KLi}_2\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$                                                             | 层状硅酸盐云母族  |
| 30 | 碱锂钛锆石 | sogdianite      | $(\text{K}, \text{Na})_2\text{Li}_2(\text{Li}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})_2\text{Zr}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_6$               | 链状硅酸盐角闪石族 |
| 31 | 锂辉石   | spodumene       | $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$                                                                                                          | 链状硅酸盐辉石族  |
| 32 | 锂蒙脱石  | swinefordite    | $\text{Li}(\text{Al}, \text{Li}, \text{Mg})_4(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_4 \cdot \text{NH}_2\text{O}$ | 层状硅酸盐蒙脱石族 |
| 33 | 带云母   | taeniolite      | $\text{KLiMg}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$                                                                                   | 层状硅酸盐云母族  |
| 34 | 羟磷锂铁石 | tavorite        | $\text{LiFe}^{3+}\text{PO}_4\text{OH}$                                                                                               | 架状磷酸盐磷铝石族 |
| 35 | 磷铁锂矿  | triphylite      | $\text{Li}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})\text{PO}_4$                                                                               | 架状磷酸盐     |
| 36 | 硅锂石   | virgilite       | $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$                                                                                                          | 架状硅酸盐似长石族 |
| 37 | 铁锂云母  | zinnwaldite     | $\text{K}(\text{Li}, \text{Al}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$                            | 层状硅酸盐云母族  |

资料来源：<http://mindat.org/>。

锂作为一种重要的能源金属，在高性能锂电池、受控热核反应中的应用使锂成为人类长期能源供给的重要原料。同时，锂的化合物广泛应用于玻璃陶瓷工业、冶炼工业、锂基润滑剂以及空调、医药、铸造等工业领域（表 1-2）。

表1-2 锂金属产品的用途

| 应用领域   | 锂的作用                                                                                                                   |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 核原料    | 锂是生产氢弹、中子弹、质子弹的重要原料，因氢弹核聚变需要 <sup>6</sup> Li同位素                                                                        |
| 火箭燃料   | 1kg锂燃烧后可释放42998kJ的热量。锂或锂的化合物可制作固体燃料，用作火箭、导弹、宇宙飞船的推动力                                                                   |
| 锂电池    | 锂电池具有开路电压高、比能量高、工作温度范围宽、放电平衡、自放电等优点，包括原电池和次级电池，电动汽车领域也开始应用                                                             |
| 润滑剂    | 锂提供润滑脂中的增稠剂，使其在各种湿度条件下保持润滑特性                                                                                           |
| 玻璃     | 锂玻璃的溶解性是普通玻璃的1/100，并可抗酸腐蚀                                                                                              |
| 陶瓷     | 通过直接添加锂辉石矿，降低烧成温度或热膨胀系数，提高瓷坯强度；添加锂到釉料中可改善涂层黏度，改善釉料色泽                                                                   |
| 冶金     | 利用锂能强烈与O、N、Cl、S反应的性质，充当脱氧剂和脱硫剂；加入少量锂，能使铜更加致密，并提高导电性，去除杂质；铝冶炼过程中添加锂可降低熔体温度，降低能耗，提升熔体导电率，减少含氟排放物；制造优质特殊合金钢材，锂是清除杂质最理想的材料 |
| 轻便合金材料 | 加入Li、Mg、Be的铝合金轻便坚硬，飞机质量减轻2/3；Li-Pb合金是良好的减摩材料                                                                           |

续表

| 应用领域 | 锂的作用                                                             |
|------|------------------------------------------------------------------|
| 空调制造 | 使用溴化锂作为工业制冷系统的吸收介质，使用氯化锂作为湿度控制和干燥系统的吸收介质                         |
| 医药   | 用于抑郁症治疗，以及生产其他医药产品                                               |
| 连续铸造 | 在连铸保护渣中添加锂可助熔和提高流动性，改善连铸的黏度和流动性；用于铁铸件（如发动机体）的生产，以降低开裂效应，从而减少次品数量 |
| 其他   | 丁基锂用于合成橡胶的催化剂；铈酸锂和钽酸锂应用于电子工业、混凝土掺和料、水处理、磁性材料、荧光材料、压电材料等          |

锂被公认为未来动力能源的发展方向。在政治考量、环境、经济激励等多种因素共同推动下，锂矿资源成为国际矿业市场的焦点和热点，锂作为战略资源的地位也显示出来。近年来，锂在传统应用领域的消费稳定增长，在电池领域的应用则快速增长。1997 年，全球锂电池领域锂的消费占总消费的比重为 7%；2014 年，此比重已经上升至 46%，锂电池已成为全球锂的最大消费领域（图 1-1）。

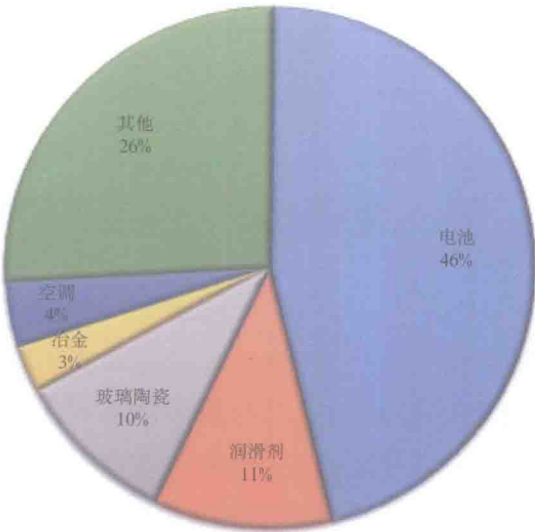


图1-1 全球锂矿资源消费情况  
数据来源：Signum Box，2015

二、锂矿资源存在形式

世界已发现和新发现并做过可靠计算及初步估算的锂矿资源主要分为两大类，即卤水



型锂矿资源，主要产于盐湖中，约占全球探明储量的 80%；固体型锂矿资源，约占 20%。固体型锂矿床又主要以两种形式产出：一种产于交代伟晶岩脉中，主要赋锂矿物为锂辉石、透锂长石和锂云母等；另一种产于富锂的沉积地层中，主要赋锂矿物为锂蒙脱石。

在锂矿产开发进程中，长期以来一直围绕锂辉石、透锂长石及锂云母等含锂矿物的加工和提纯进行。20 世纪 80 年代以前，经济上可采的及次经济资源 85% 为固体型锂矿资源。20 世纪 70 ~ 80 年代，从含锂卤水中提取和回收锂、生产碳酸锂的技术不断提高，其应用范围也不断扩大，使得卤水提锂成为生产碳酸锂、氧化锂及各种锂化合物的重要原材料来源。目前，经济上可开采的及次经济资源的锂总量中，固体型只占 8.8%，而卤水型占 91.2%（表 1-3）。

表1-3 全球锂矿资源开发方向变化

| 类型  | 矿床数/个 | 20世纪80年代以前可开采的资源/10 <sup>4</sup> t | 所占比例/% | 20世纪80年代以后可开采及新发现的次经济资源/10 <sup>4</sup> t | 所占比例/% |
|-----|-------|------------------------------------|--------|-------------------------------------------|--------|
| 固体型 | 34    | 132                                | 85.0   | 108                                       | 8.8    |
| 卤水型 | 6     | 23.2                               | 15.0   | 1143.6                                    | 91.2   |
| 合计  | 40    | 155.2                              | 100.0  | 12514.6                                   | 100.0  |

资料来源：汪镜亮，1999。

## 第二节 全球锂矿资源成矿规律

全球锂矿床主要有三大类型：一是含锂卤水，即盐湖卤水型锂矿床，属于内陆盐湖蒸发残留矿床中未蒸发干的含锂液体矿产；二是伟晶岩型锂矿床，主要赋锂矿物为花岗伟晶岩中产出的锂辉石、透锂长石、锂云母等；三是 21 世纪初勘查发现的沉积型锂矿床，以黏土岩和湖相沉积物为赋矿层，该类型锂矿床储量可观，但多处于勘查及可行性研究阶段。伟晶岩型锂矿床和沉积型锂矿床均属于固体型锂矿，从经济价值和可采程度看，卤水型锂矿的重要性大于固体型锂矿。

### 一、盐湖卤水型锂矿床成矿规律

盐湖卤水型锂矿床是由溶解大量锂的含盐地下水堆积而成，多分布在干旱、半干旱地

区的封闭盆地中，矿床中的锂均以晶间卤水、孔隙卤水及地表卤水的形态出现。

决定非海成盆地能否堆积含锂卤水的一个非常重要的因素是盆地是否封闭。封闭盆地是由于构造作用形成，但是封闭盆地的存在也取决于区域长时间的蒸发量大于降水量。如果盆地的降水率长期增长得较快，最终湖水将超过分水岭高度并流出盆地，其中含锂卤水也将排出盆地。因此，干旱的气候也是形成盐湖矿床必不可少的因素。这种气候条件使湖泊中含少量盐分的淡水不断浓缩，通常赋锂盆地的年蒸发量是降雨量的 22 ~ 200 倍。同时，锂有很高的溶解度，不像钠、钾、钙在蒸发浓缩时会形成蒸发盐矿物，而是存在于浅层地下蒸发剩余的卤水中，有经济价值的卤水含锂浓度通常在 200 ~ 4000mg/L 的范围。

1. 分布特征

全球盐湖卤水型锂矿分布在赤道两边的干旱纬度带，雨影效应（高峻的山脉能阻隔季风，使迎风坡一面降水增多，背风坡降水较少，形成雨影效应）可能会扩大有利成矿带的纬度范围。有利成矿带在北纬 30° ~ 40° 温带干旱气候区及南纬 20° ~ 30° 热带干旱气候区。

全球产出盐湖卤水型锂矿床的盆地，有 3 个处于半干旱地区，11 个处于干旱地区，1 个处于重度干旱地区。全球盐湖卤水型锂矿床多位于大陆西岸或内陆西侧雨影区内降雨量少、日照及风力强度大、蒸发量大的干旱、半干旱封闭汇水盆地，这样的地理环境使得卤水中的溶质锂能够在封闭系统中进行自然富集浓缩（CGIAR SCI,2014；高峰等，2011）。盐湖卤水型锂矿床中的锂主要源于周围岩浆热液流体和火山喷出物，所以盐湖卤水型锂矿床常位于新生代地质活动较为活跃的构造区域，例如大陆边缘弧后盆地、断裂带扩张克拉通盆地和碰撞带山间槽地和盆地等地区（郑绵平，1989）。地理位置主要分布在南美洲安第斯高原、中国青藏高原、美国西南部（图 1-2；表 1-4）。

表1-4 全球主要盐湖卤水型锂矿床

| 盐湖名称      | 所处位置 | 海拔<br>m | 面积<br>km <sup>2</sup> | 降雨量<br>(mm · a <sup>-1</sup> ) | 蒸发量<br>(mm · a <sup>-1</sup> ) | 锂浓度<br>10 <sup>-6</sup> | 镁锂比   | 类型 | 资源量<br>10 <sup>4</sup> t | 所有者     | 参考资料             |
|-----------|------|---------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------|----|--------------------------|---------|------------------|
| 乌尤尼盐湖     | 玻利维亚 | 3650    | 10582                 | 100                            | 1700                           | 80~1150                 | 9.28  | MS | 1800                     | Comibol | Garrett, 1998    |
| 阿塔卡玛盐湖    | 智利   | 2300    | 2229                  | 30                             | 3833                           | 1000~4000               | 6.225 | MS | 530                      | SQM     | Ide et al., 1989 |
| 扎布耶盐湖     | 中国西藏 | 4422    | 247                   | 196                            | 2269                           | 1724                    | 0.005 | SC | 139.7                    | 西藏矿业    | 郑绵平等, 1989       |
| 察尔汗盐湖     | 中国青海 | 2670    | 5856                  | 25                             | 3370                           | 10.3~72                 | 1837  | U  | 119.2                    | 青海盐湖    | 郑绵平等, 1989       |
| 翁布雷穆埃尔托盐湖 | 阿根廷  | 4300    | 565                   | 20                             | 2300                           | 220~1000                | 1.37  | NS | 85                       | FMC     | Garrett, 1998    |

续表

| 盐湖名称    | 所处位置 | 海拔<br>m | 面积<br>km <sup>2</sup> | 降雨量<br>(mm·a <sup>-1</sup> ) | 蒸发量<br>(mm·a <sup>-1</sup> ) | 锂浓度<br>10 <sup>-6</sup> | 镁锂比   | 类型 | 资源量<br>10 <sup>4</sup> t | 所有者      | 参考资料                |
|---------|------|---------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------|----|--------------------------|----------|---------------------|
| 西台吉乃尔盐湖 | 中国青海 | 2680    | 560                   | 18                           | 2506                         | 256                     | 65.57 | MS | 44.1                     | 中信国安     | 吴小王等, 2012          |
| 一里坪盐湖   | 中国青海 | 2683    | 250                   | 21                           | 3027                         | 262                     | 92.3  | MS | 29.2                     | 五矿集团     | 黄师强, 2001           |
| 当雄措盐湖   | 中国西藏 | 4475    | 318                   | 151                          | 2302                         | 371                     | 0.22  | MC | 14                       | 中川矿业     | 伍倩等, 2013           |
| 林孔盐湖    | 阿根廷  | 3660    | 260                   | 20                           | 3000                         | 330                     | 8.61  | MS | 14                       | Rincon   | 陈玉明等, 2013          |
| 希尔顿盐湖   | 美国   | 512     | 768                   | 96                           | 2000                         | 81                      | 1.3   | U  | 31.6                     | Simbol   | 郑绵平等, 1989          |
| 银峰盐湖    | 美国   | 1300    | 83                    | 108                          | 1065                         | 160                     | 1.43  | NS | 11.5                     | Rockwood | Harben et al., 1998 |
| 东台吉乃尔盐湖 | 中国青海 | 2683    | 210                   | 18                           | 3102                         | 350                     | 40.32 | MS | 9                        | 中信国安     | 唐发满等, 2012          |

数据来源: SNL Financial LC., 2014; 资源量以Li<sub>2</sub>O当量计。MS—硫酸镁亚型; NS—硫酸钠亚型; SC—强度碳酸盐型; U—氯化物型; MC—中度碳酸盐型。



图1-2 全球主要盐湖卤水型锂矿床分布  
(据SNL Financial LC., 2014)



(1) 南美洲安第斯高原盐湖区

南美洲安第斯高原赋锂盐湖群分布在智利、阿根廷和玻利维亚交界的荒原中，位于南纬  $18^{\circ} \sim 28^{\circ}$  之间（图 1-3）。该区气候干燥，日照充足，蒸发量大，在 100 多万平方千米范围内发育有 100 多个盐湖，赋存了全球 68.8% 的锂资源，供应了世界上超过一半的锂矿产品。安第斯高原盐湖群中，玻利维亚乌尤尼盐湖（Salar de Uyuni）、智利阿塔卡玛盐湖（Salar de Atacama）和阿根廷翁布雷穆埃尔托盐湖（Salar de Hombre Muerto）均为世界级超大型盐湖卤水型锂矿床（表 1-4）。



图1-3 南美洲安第斯高原盐湖群分布

其中，位于玻利维亚西南部的乌尤尼盐湖是全球资源量最大的盐湖卤水型锂矿床，海拔 3650m，面积 10582km<sup>2</sup>，盐层平均深度为 121m，资源量（以 Li<sub>2</sub>O 当量计）约为 1800 × 10<sup>4</sup>t，卤水锂浓度为 80 × 10<sup>-6</sup> ~ 1150 × 10<sup>-6</sup>（表 1-4），但玻利维亚政府严格控

制境内锂矿的开采，目前该盐湖由玻利维亚国家矿业公司（Comibol）从事可行性研究工作，预计 2020 年投产，计划产能  $3 \times 10^4 \text{t/a}$ （以  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  当量计）。位于智利北部的阿塔卡玛盐湖是全球第二大盐湖卤水型锂矿床，海拔 2300m，面积  $2229 \text{km}^2$ ，盐层深度为 360 ~ 400m，资源量（以  $\text{Li}_2\text{O}$  计）约  $530 \times 10^4 \text{t}$ ，卤水锂浓度为  $1000 \times 10^{-6} \sim 4000 \times 10^{-6}$ （表 1-4），目前由全球最大的锂业公司智利化学矿业公司（Sociedad Quimicay Minera de Chile SA）进行开发，2014 年碳酸锂年产能为  $4.8 \times 10^4 \text{t}$ ，氢氧化锂年产能为 6000t。位于阿根廷西北部的翁布雷穆埃尔托盐湖是世界第五大盐湖卤水型锂矿床，海拔 4300m，卤水面积  $565 \text{km}^2$ ，估计含锂卤水  $8000 \times 10^8 \text{t}$ ，资源量（以  $\text{Li}_2\text{O}$  当量计）约  $85 \times 10^4 \text{t}$ ，浓度为  $220 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ （表 1-4），美国富美实公司（FMC Corporation）拥有该盐湖 100% 的开采权，2014 年碳酸锂产量为  $3.2 \times 10^4 \text{t}$ 。

## （2）中国青藏高原盐湖区

中国盐湖锂资源主要分布在青海省和西藏自治区（图 1-4），其中青海的锂资源主要赋存于硫酸盐型盐湖中，西藏的锂资源主要赋存于碳酸盐型盐湖中。青藏高原的隆升阻挡了来自印度洋的暖湿气流，促使高原气候向干（旱）寒（冷）方向发展，在高原的中部、

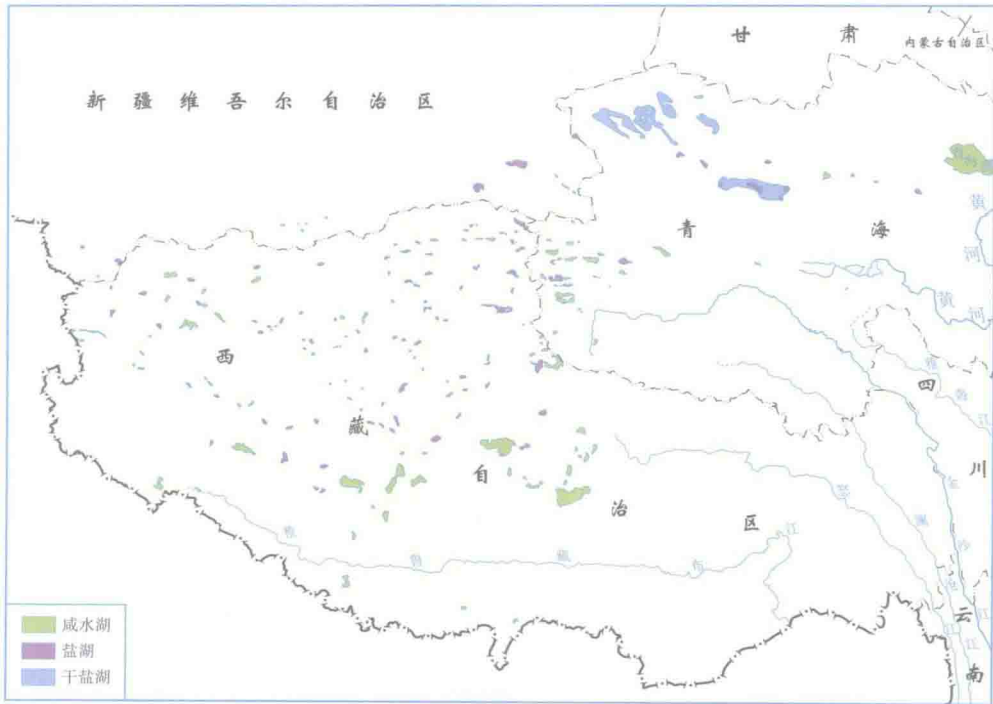


图1-4 青藏高原盐湖分布  
(据郑绵平等, 1989, 修编)

西部和北部形成了众多的盐湖，其中富锂盐湖 80 多个 ( $\text{LiCl} \geq 300\text{mg/L}$ )。青藏高原由南向北，盐湖的水化学类型由碳酸盐型向硫酸盐型和氯化物型过渡。在青藏高原上升的地质历史时期，干旱气候由南向北逐渐加剧，导致盐湖发育北早南晚，因此，柴达木盆地盐湖的规模和形成时间都远大于西藏盐湖，而卤水中的锂含量由北向南则是逐渐增多（郑绵平等，1989；杨绍修，1989；韩凤清，2011）。例如，察尔汗盐湖面积达到  $5856\text{km}^2$ ，卤水中锂的浓度为  $15.6\text{mg/L}$ ；而扎布耶盐湖面积只有  $247\text{km}^2$ ，卤水中锂的浓度高达  $632\text{mg/L}$ 。青藏高原盐湖卤水中锂资源量可达  $550 \times 10^4\text{t}$ ，其锂资源的提取利用，是中国锂盐产业开发的重要方向之一。

西藏的锂资源集中在藏北仲巴县扎布耶盐湖，为世界罕见的硼、锂、钾、铯等综合性盐湖矿床，其中的锂、硼含量均达到超大型规模。扎布耶盐湖海拔  $4422\text{m}$ ，资源量（以  $\text{Li}_2\text{O}$  计）达  $139.7 \times 10^4\text{t}$ ，是含锂量仅次于乌尤尼盐湖和阿塔卡玛盐湖的全球第三大盐湖卤水型锂矿床，同时也是全球镁锂比最低的优质的碳酸盐型盐湖。青海的锂盐湖资源集中在柴达木盆地的察尔汗盐湖，是全球罕见的大型第四纪内陆硫酸盐型盐湖，为除乌尤尼盐湖外的全球第二大干盐湖，面积  $5856\text{km}^2$ ，湖面海拔  $2675\text{m}$ ，蒸发量是降水量的 135 倍，锂矿资源主要以晶间卤水形式赋存在沉积盐层孔隙中，埋藏较浅，资源量（以  $\text{Li}_2\text{O}$  计）达  $119.2 \times 10^4\text{t}$ ，居世界第四位。此外，目前正在开发的青海锂盐湖还有东台吉乃尔湖和西台吉乃尔湖，海拔均约为  $2681\text{m}$ ，面积分别为  $210\text{km}^2$  和  $560\text{km}^2$ ，锂浓度分别为  $331.5\text{mg/L}$  和  $336.3\text{mg/L}$ ，储量分别约为  $9 \times 10^4\text{t}$  和  $44.1 \times 10^4\text{t}$ （以  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  当量计）（表 1-4）。其他具代表性的富锂盐湖有西藏当雄错盐湖以及青海西台吉乃尔盐湖、一里坪盐湖等，这些盐湖中的锂含量均达到或超过边界品位以上 ( $\text{LiCl} \geq 150\text{mg/L}$ )。

### （3）美国西南部盐湖区

位于美国西南部的赋锂盐湖群分布在内华达州、加利福尼亚州和犹他州，其中银峰 (Silver Peak) 盐湖、希尔斯 (Salton Sea) 盐湖和金斯山 (Kings Mountain) 盐湖等属于中型盐湖卤水锂矿床。预测内华达盐湖群的锂资源量（以  $\text{Li}_2\text{O}$  计）可达  $550 \times 10^4\text{t}$ ，已探明的储量（以  $\text{Li}_2\text{O}$  计）为  $27 \times 10^4\text{t}$ 。目前只有洛克伍德 (Rockwood) 公司在美国从事赋锂盐湖的开采工作。

## 2. 成矿特征

根据全球矿床分布特征可以发现，盐湖卤水型锂矿床形成于多风、少雨、干燥的气候环境下的封闭汇水盆地内，周围新生代火山活动频繁，断层发育，赋锂围岩、岩浆热液活动和火山喷出物等提供了丰富的物质来源，在长期的地质作用和气候条件影响下，汇聚蒸发形成矿床。

具体的成矿特点总结如下：

### (1) 气候条件

全球已发现的所有盐湖卤水型锂矿床均分布在新生代干旱盆地中。例如，南美洲安第斯高原赋锂盐湖群位于安第斯山脉的高寒气候区，安第斯山脉构成雨水隔离带 (Donald, 2004)，使得盆地内年蒸发量是年降水量的 17 倍 (表 1-4)。青藏高原的隆升阻挡了来自印度洋的暖湿气流，促使高原气候向干寒方向发展，在高原的中部、西部和北部形成了众多的盐湖，其中富锂盐湖 80 多个 ( $\text{LiCl} \geq 300 \times 10^{-6}$ ) (罗莎莎等, 2004；郑绵平等, 1989)。美国西南部赋锂盐湖群位于太平洋海岸山脉与落基山脉之间，位置深居内陆，海洋水汽难以进入，形成干燥少雨的内陆型气候 (Warren, 2010)。锂在整个化学风化过程中都是可溶解的，在封闭的盆地中，尤其是高蒸发区，锂大部分残留在卤水中，并随着蒸发风化而富集成矿。

此外，成矿区周围一般高山环绕。例如，阿塔卡玛盐湖所处的智利北部阿塔卡玛盆地，东、西两侧分别分布有安第斯山脉及太平洋海岸山脉，山区与盆地之间的高程差达到了 2000m 以上 (Warren, 2010)。数千米的高程差形成了水文气候的差动效应，高峻山脉的阻隔了季风，迎风区雨量较多，而盆地内背风区因雨影效应而极度干旱。同时，来自山区的季节性水流汇聚入盆地，在盆地中强烈蒸发，卤水中的溶质锂在封闭系统中自然富集浓缩，经数万年以上循环往复，足以成矿。

### (2) 物质来源

高原地区的含锂原岩是盐湖卤水型锂矿床成矿物质的重要来源。高原地区的山系中广泛分布着各个时期的花岗岩、花岗斑岩、长英质凝灰岩、含锂伟晶岩和黏土岩等，在岩石的风化过程中锂被淋滤溶解，随着河流汇聚入成矿盆地。例如，柴达木盆地周边基岩易溶盐含量明显高于其他地区，且成分分布与察尔汗盐湖含量分布情况相吻合 (王春男等, 2008)。

同时，周边火山系统及地下岩浆体所产生的地热活动带出的成矿物质，随着河流和地下水系统进入盆地，构成了盐湖卤水型锂矿床的又一主要物质来源。例如，阿塔卡玛盐湖近 1/10 的锂来自于 Ei Tatio 地区的间歇泉，安第斯高原地区分布有众多的新生代火山和地热泉，地热水将近期火山活动形成的地热流体或岩石中的锂、硼等成矿元素淋滤浸出，沿断层上涌形成间歇泉，该间歇泉从盆地北部汇入里约圣佩德罗河，最终流入盐湖中，河水中的锂浓度达到了  $26 \times 10^{-6} \sim 47 \times 10^{-6}$  (Jordan et al., 2002)。柴达木盆地内发育了相距较近的一里坪盐湖及东、西台吉乃尔盐湖 3 个大中型赋锂盐湖，其主要成矿物质来源于那棱格勒河。该河沿昆南断裂分布，断裂带两侧存在一系列新生代火山活动，河水溶解了与火山及断裂活动有关的温泉热水中的成矿物质，使得河水中的锂浓度较盆地中其他



河流高出了 50 ~ 100 倍 (朱允铸等, 1989)。相关研究证明, 美国银峰盐湖锂的主要来源为沿银峰断裂上涌而来的热泉, 盐湖内深 25.5m 处的卤水温度高达 44℃ 成为有力的佐证 (Davis et al., 1986; Price et al., 2000)。

另一种重要的锂来源是发生在盆地地质史较早期的湖泊沉积矿床 (Vine, 1980)。例如, 柴达木盆地经历了上新世末和中更新世末的两次大规模构造运动, 使得古近纪开始沉积形成的柴达木古湖支解成几个次级盆地, 从而形成了察尔汗盐湖, 使其继承了古湖的盐类物质 (韩凤清, 2010; 王春男等, 2008; 李文鹏等, 1993)。扎布耶盐湖在晚更新世也经历了“泛湖时期”, 汇水范围广阔, 聚集了大量硼、锂成矿物质, 同时在盆地内发现的中新世富硼、锂火山沉积, 也是其重要的一个物质来源 (刘喜方等, 2007, 1999)。

此外, 大多地区的新生代地层中高矿化度的油田水 (及深部地层水) 中均普遍含有锂, 也构成了盐湖卤水型锂矿床的物质来源。例如, 柴达木盆地内广泛分布油田水, 在察尔汗盐湖形成早期, 构造活动强烈, 油田水通过断层流入盐湖, 是成矿物质的重要补给来源之一 (段振豪等, 1988)。

### (3) 卤水含量与分布

就卤水含量而言, 锂有很高的溶解度, 不像钠、钾、钙在蒸发浓缩时会形成蒸发盐矿物, 取而代之的是, 锂在浅层 (一般不超过 50m) 地下存在于蒸发剩余的卤水中, 有经济价值的卤水含锂浓度通常为 200 ~ 4000mg/L (Kesler et al., 2012)。盐壳中锂含量与深度、密度、孔隙度有关, 深层锂含量与蒸发岩、沉积岩排列有关。水岩反应也被认为增加了卤水组分。例如, 扎布耶盐湖地区的地层中锂、硼等成矿元素相对其他矿区含量较低, 但经历了长期风化淋滤及浸泡等水岩交互作用, 成矿元素较容易被浸出, 并随河流不断向湖中迁移, 形成了盐湖成矿物质的来源之一 (刘喜方等, 2007, 1999)。

就卤水分布而言, 与断层作用直接相关。例如, 阿塔卡玛盆地中心形成于沉积时期的深大断裂 (沿 NNW 向展布) 导致东、西两侧沉积厚度相差 240m, 从而导致盆地东西卤水分布深度不同; 而在美国克莱顿河谷卤水都沿活动的盆地内断层分布 (Donald, 2004; Price et al., 2000)。

### (4) 地质构造

似乎所有的锂矿盆地都经历过断层活动。例如, 扎布耶盐湖区发育有大量的断陷盆地和复杂的褶皱和断裂。察尔汗盐湖所在的柴达木盆地构造活动活跃, 尤其是盆地西部地区新近纪、古近纪地层中一系列的构造裂隙、孔隙为地下水的储存提供了巨大的空间 (李文鹏等, 1993; 罗莎莎等, 2004)。而相比产出于克拉通地区深度较浅的盆地, 如撒哈拉沙漠缺少断层活动控制, 也就没有卤水型锂矿的前景可言。盆地本身只有很薄的地层中孔隙



可以供沉积矿物质，但断层引起的下沉提供了成矿更大的容矿空间，较厚的盆地充填沉积提供了足够体积的蓄水层，储存了可利用的卤水资源。此外，断层还是地下热流上升的良好通道，为盐湖提供了重要的成矿物质的补给。

同时，新生代构造活动及火山活动活跃是盐湖卤水型锂矿床又一个重要的成矿特征。例如，南美洲赋锂盐湖群分布在安第斯山脉的普纳高原上，形成于白垩纪末至古近纪，目前地壳活动仍然比较剧烈（Risacher et al., 2003）。青藏高原赋锂盐湖群位于喜马拉雅造山带挤压断层上盘，在封闭盆地中存在大量的深部岩浆热液活动（刘喜方等，2007）。美国西南部赋锂盐湖群处于一个外延的半地堑系统中，在中生代—新生代造山活动旋回期间形成，目前存在多处活火山（Davis et al., 1986；Price et al., 2000）。

盐湖卤水型锂矿床按构造特征可进一步划分为后弧挤压盆地大陆型盐湖、后弧扩张克拉通盆地型盐湖以及前陆和后陆山间槽地和盆地型盐湖（表 1-5）。

表1-5 盐湖卤水型锂矿床按构造特征分类

| 分类   | 后弧挤压盆地大陆型盐湖             | 后弧扩张克拉通盆地型盐湖               | 前陆和后陆山间槽地和盆地型盐湖                         |
|------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|
| 分布特征 | 分布在大陆型地壳上，属于陆缘延伸部分      | 分布在年轻的变质杂岩中心带和崩落带间的外延半地堑系统 | 分布在碰撞形成的断裂系统，在原有的后弧盆地和火山弧上发展而来的山间槽地或盆地中 |
| 物质来源 | 新生代含盐岩系中的锂和火山活动形成的含锂地热水 | 新生代火山岩风化和含锂地热水             | 碰撞阶段形成的酸性含锂的深部再熔岩浆                      |
| 成矿特征 | 存在浅层含锂卤水，拥有巨厚的石盐沉积      | 由酸性火山岩风化或地热活动等化学沉积作用形成     | 酸性再熔岩浆以地热形式携出地表                         |
| 典型矿床 | 南美洲安第斯高原盐湖群             | 美国西南部盐湖群                   | 中国青藏高原盐湖群                               |

资料来源：据郑绵平（1998）观点整理。

后弧挤压盆地大陆型盐湖卤水锂矿床主要特点：盐湖群附近新生代火山活动十分发育，且新生代含盐岩系中的含锂地热水，成为盐湖特有成分的双重补给，使盐湖群中的盐湖大部分都存在浅层含锂卤水，且拥有巨厚的石盐沉积（郑绵平，1998）。其中，南美洲安第斯高原盐湖群中产出的锂矿床属于该类型，高原地势较高且内部渗透率高，富锂盐湖沿安第斯聚合边缘造山带分布，典型矿床包括阿根廷西北部的翁布雷穆埃尔托盐湖、玻利维亚西部的乌尤尼盐湖和智利北部的阿塔卡玛盐湖。

后弧扩张克拉通盆地型盐湖卤水锂矿床主要特点：该类盐湖盆地处在一个外延的半地堑系统中，半地堑位于一个年轻的变质杂岩中心带和崩落带间。盆地中被第四纪的沉积物所覆盖，其中有黏土矿物。附近的新生代火山活动亦较普遍，并见含硼、锂地热水补给。其最重要的成矿物质来源是延伸并贯穿了整个盆地的火山灰，这是该类型富锂盐

湖与其他类型盐湖最大的不同点。该区的卤水是化学沉积形成的，最大的可能是来自酸性火山岩的风化或附近火山系统、地下岩浆体的地热活动。同时，水岩反应先消耗掉卤水中的镁，也作为该区卤水中锂富集的一个可能原因（郑绵平，1998）。其中，美国西部的盆地和山脉省的新生代盐湖沉积属于该类型锂矿床，典型矿床包括美国内华达州的银峰湖和犹他州的大盐湖。

前陆和后陆山间槽地和盆地型盐湖卤水锂矿床主要特点：前陆和后陆山间槽地和盆地是指在大陆碰撞带由板块间碰撞而在原来的后弧盆地和火山弧等构造带基础上，由于碰撞形成断裂系统而发展起来的一系列山间槽地或盆地，盐湖即在该构造带发育和演化。这类盐湖可以以西藏扎布耶盐湖和青海察尔汗盐湖为例。由于印度板块与欧亚板块碰撞而使青藏高原物质向东位移，并使大批较老的断层复活，而形成4种类型湖盆——山间断块深盆、带内拗断、微裂谷和走滑湖盆，其中尤以呈南北向的新生代微裂谷更为发育，且其下部存在与晚新生代断裂有关的岩浆活动环状构造。在青藏高原盐湖区，晚新生代岩浆活动的最大特征之一是以深部侵位为主，只在少数地段以火山岩流溢出地表。其成因可能与该区碰撞特征和壳层较厚（5 ~ 8km）有关，使在碰撞阶段形成的酸性再熔岩浆多处于深部，再熔岩浆的硼、锂特殊组分多以地热形式携出地表，而与上述两类构造带以火山活动强烈的特点不同（郑绵平，1998）。

### 3. 成矿规律

所有具有经济价值的盐湖卤水型锂矿床成矿规律都有以下特点：干燥的气候条件，具有干盐湖或盐沼的封闭盆地，构造上经历过沉降，与火山或地热活动有关，有含锂源岩，一层或多层充足的含水层，足够的时间浓缩卤水。

理想的盐湖卤水型锂矿模型见图1-5。首先，在地质时代早期，盆地作为物质沉降的中心，盐类物质开始向盆地汇聚，卤水中锂含量也趋于富集；随后，该区域进入挤压隆升阶段，以至于区域内古湖水开始定向迁移，汇聚于由构造的隆升形成的封闭盆地中；同时，盆地中的断层活动引起的沉降提供了足够高的卤水渗透率，从而具备了盐湖卤水型锂矿床形成的地理条件。其次，山区与盆地之间数千米的高程差形成的雨影效应使盆地内的气候条件极度干燥，从而来自山区的季节性河流汇流入湖盆后强烈蒸发浓缩，这是形成盐湖卤水型锂矿床的重要气候条件。最后，盆地附近新生代的火山活动形成的岩浆热液、富锂火山岩和盐湖周围古老含锂岩层的风化以及存在于黏土岩中的锂和邻近盆地中油田水中的锂（以深层地下水形式运移）等提供了多种形式的成矿物质的补给，加之锂较高的溶解度，除少量被黏土矿物吸附外，大部分残留在卤水中，在持续干燥气候

条件下，其浓度得以不断升高，形成盐湖卤水型锂矿床。

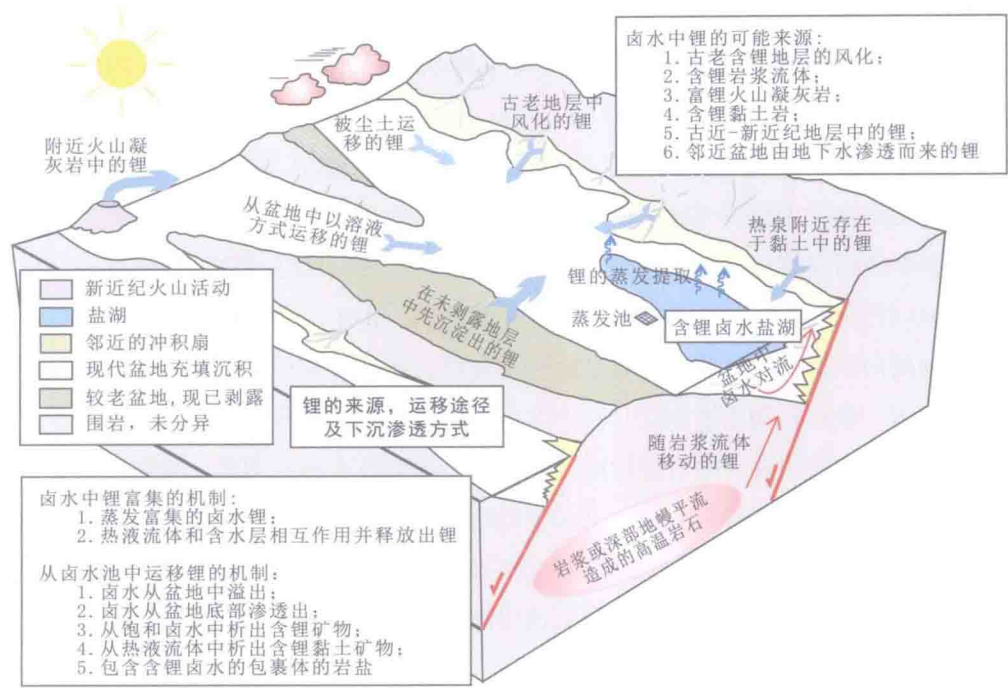


图1-5 盐湖卤水型锂矿床成矿模型  
(据Dwight Bradley et al., 2013a, 编译)

根据盐湖卤水型锂矿床的成矿规律，本书将其找矿标志归纳为以下几点：

- 1) 有断层活动的封闭盆地是形成盐湖卤水型锂矿床的必要条件。盆地的封闭性是决定非海成盆地能否堆积含锂卤水的一个重要因素，而封闭盆地是构造作用的产物，断层活动导致地层下沉，为成矿物质的沉降提供了必要的容矿空间。同时，沿断层运移上来的富锂热液提供了必要且丰富的成矿物质。
- 2) 干燥的气候也是形成盐湖卤水型锂矿床必不可少的成矿条件。封闭盆地的存在依靠于区域长时间的蒸发量大于降水量，如果盆地的降水率长期增长较快，最终含锂卤水将超过分水岭并排出盆地。这种气候条件使湖泊中含少量盐分的淡水不断浓缩，通常赋锂盆地的年蒸发量是年降雨量的 10 ~ 200 倍。
- 3) 由于赋锂的封闭盆地构造上需要经历沉降，从年轻的火山或热泉而来的热流和富锂火山灰是成矿物质的重要来源，所以新生代地质活动较为活跃也是盐湖卤水型锂矿床的一个重要的找矿标志。



## 二、伟晶岩型锂矿床成矿规律

伟晶岩型锂矿床是指产出于交代伟晶岩脉中, 具有明显的带状构造的赋锂矿床, 常发现于大型花岗岩侵入体的边缘且经常在其之上, 通过年龄分析得出二者通常为共生关系。伟晶岩的分带性特征, 也导致了锂含量的不均匀性和分带性, 其形成规模及潜在资源量均比盐湖卤水型锂矿床小。

随着板块运动或岩浆喷发, 大量的岩浆溢流出地表, 并在某一区域聚集冷却, 并产生岩浆分异结晶。富锰、铁、镁的组分最先分异结晶, 在岩浆冷却上层析出, 剩下的岩浆成分主要为花岗岩的化学组分。随着岩浆或流体继续冷却, 前期凝聚结晶的成分体积继续收缩并出现断裂, 导致剩下的花岗岩组分流体沿着这些裂隙和断裂填充, 形成结晶程度较好的花岗伟晶岩脉。而锂及其他稀有元素相对钠、钾、铝等元素在硅酸盐中的溶解性更好, 因此, 锂在岩浆分异的中晚期开始富集, 随着岩浆的继续冷却开始结晶成矿(毛景文等, 2012; Brian et al., 2014)。通过锂辉石中包裹体的研究表明, 在锂辉石中确实存在有气相、气-液相、液相、固相等包裹体, 这就充分说明伟晶岩熔体-溶液是多相成分的, 特别是富含气相成分。锂辉石从这种多相成分的伟晶岩熔体-溶液中结晶出的温度范围为  $220 \sim 520^{\circ}\text{C}$ , 压力约  $1500\text{atm}^{\text{①}}$ , 为岩浆流体中最早析出沉淀的富锂矿物(张如柏, 1974)。同时, 透锂长石在  $4 \sim 1.6\text{kbar}^{\text{②}}$ 、 $320^{\circ}\text{C}$  的条件下可以分解为锂辉石和石英(李胜荣等, 2005), 这也是自然界中大部分伟晶岩型锂矿床的赋锂矿物为锂辉石的原因。

### 1. 分布特征

伟晶岩型锂矿床分布广泛, 主要产于构造穹窿区和增生大陆边缘非造山环境, 全球较大的伟晶岩型锂矿床包括津巴布韦的比基塔锂矿床(Bikita, 赋锂矿物为透锂长石)、西澳大利亚的格林布什锂矿床(Gwalia Greenbushes, 赋锂矿物为锂辉石)、加拿大的伯尼克锂矿床(Tanco, 赋锂矿物为低铁锂辉石)、中国的宜春锂矿床(赋锂矿物为锂云母)、刚果(金)的马诺诺-基托托洛锂矿床(Manono, 赋锂矿物为多种锂矿物)、美国北卡罗来纳州金斯山锂矿和贝瑟默锂矿(两个矿床均已停产)等。此外, 在巴西、纳米比亚、葡萄牙、芬兰、阿富汗和南非也有伟晶岩型锂矿床分布(表1-6)。其中, 格林布什锂矿床是全球储量最大、品质最好的锂辉石矿床, 目前其勘查开发权由澳大利亚泰利森公司控制。2013年9月, 中国天齐锂业集团与美国洛克伍德公司竞购泰利森公司51%的股份获得成功,

①  $1\text{atm}=101325\text{Pa}$ 。

②  $1\text{bar}=100\text{kPa}$ 。