

锂矿主要类型、特征、时空分布及找矿潜力分析

导读：

锂是重要的能源金属，需求旺盛，市场火爆，我国大量进口。锂矿研究是热点，不断有新的矿床类型发现，许多学者都从不同角度对锂矿床的类型进行过划分，目前还缺少能够反映最新发现矿床新类型的统一分类方案，此外全球锂矿勘探开发形势及找矿潜力分析研究成果也不多。隰弯弯等在国家重点研发计划（2021YFC2901804）等项目资助下，根据前人研究结果，综合考虑资源禀赋、矿床成因、全球分布等特征，同时结合中国锂矿主要类型，提出了一种锂矿床分类方案，将全球锂矿划分为 6 种类型，并研究了目前可开发利用的锂矿床主要类型地质特征、时空分布规律；分析了锂矿找矿潜力，认为盐湖卤水型和伟晶岩型锂矿找矿潜力大，是目前勘探开发的主要类型。**研究成果有助于锂矿勘查、研究和管理者全面了解掌握全球锂矿主要类型特征、成矿时代和分布特征。**

目 录

0 引言	3
1 主要类型	3
1.1 盐湖卤水型	4
1.2 伟晶岩型	7
1.3 黏土型	8
1.4 锂沸石型	9
1.5 其他卤水型	10
1.6 离子吸附型	11
2 成矿时代及分布特征	12
2.1 成矿时代	12
2.2 分布特征	15
2.2.1 锂三角地区	16
2.2.2 西澳克拉通皮尔巴拉地块-伊尔岗地块	17
2.2.3 中国川藏地区	18
2.2.4 刚果克拉通	19
2.2.5 西非克拉通马恩-莱奥地盾	21
2.2.6 北美西部盆地	21
2.2.7 北美东部褶皱带和地盾区	22
2.2.8 其他锂矿分布区	23
3 勘探开发及找矿潜力分析	23
4 结语	26

0 引言

锂元素于 1817 年由瑞典化学家 Johan Arfvedson 发现, August Matthiessen 和 Robert Bensen 于 1855 年首次分离出可供使用的锂金属。此后, 锂逐渐广泛应用于电池、陶瓷、玻璃、空气处理、润滑剂、医药及有机合成等传统和新兴领域, 被称为“21 世纪绿色高能金属”和“白色石油”, 是不可或缺的工业原料。近年来, 随着信息技术和电动汽车的迅猛发展, 全球对锂金属的需求与日俱增, 2019 年, 全球锂消费量约 31 万 t, 预测至 2030 年, 全球锂需求量为 100~160 万 t (注: 如非特别说明, 文中锂的计量单位均为碳酸锂当量), 至本世纪末, 全球对锂的需求为 0.6~1 亿 t。

目前, 中国是全球第一大新能源汽车开发生产国, 对锂需求量最高。据预测, 2030 年中国锂需求为 70 万 t, 约 45~50 万 t 锂依赖进口。笔者所在团队对锂三角地区锂矿资源禀赋和开发情况进行了详细调查, 本文在团队调查统计数据及前人研究的基础上, 以自己有限的见识总结了锂矿的主要类型、特征和时空分布。

1 主要类型

许多学者都从不同角度对锂矿床的类型进行过划分, 部分学者根据其矿石形态和成因类型将锂矿床划分为硬岩锂矿 (内生) 和卤水锂矿 (外生) 两个大类。硬岩锂矿进一步划分为花岗伟晶岩型、花岗岩型、云英岩型、黏土型和湖相沉积型等亚类; 卤水锂矿进一步划分为大陆盐湖型、地热卤水型和气田卤水型等亚类。部分学者根据锂的赋存状态和开发特征, 将锂矿床主要划分为三类: 卤水型、伟晶岩型和沉积岩型。其中, 卤水型矿床主要为大陆盐湖卤水; 沉积岩型矿床主要包括黏土型矿床和湖相沉积型矿床。此外, 近年来铝土矿中的锂得到了越来越多的重视和研究,

相应的离子吸附型锂矿已经成为不可忽视的资源。本文根据前人研究结果，综合考虑资源禀赋、矿床成因、全球分布等特征，以 Bradley 等提出的分类为主要参考，同时结合中国锂矿主要类型，将全球锂矿划分为 6 种类型：盐湖卤水型、伟晶岩型（包括相关的花岗岩型及云英岩型）、黏土型、锂沸石型、其他卤水型（目前包含油气田卤水和地热卤水两种亚类）和离子吸附型（表 1）。其中，盐湖卤水型因其巨大的资源量和便捷的开发方式将其从卤水锂矿中单独分出，伟晶岩型锂矿因分布广泛、资源量大且开发程度最高而单分一类，其他类型锂矿也因各具独特的成因或赋存状态而相互区分。

表1锂矿类型划分

锂矿类型	主要矿物或成分	典型矿床
盐湖卤水型	钾、钠、钙、镁锂的氯化物、硫酸盐、硼酸盐和碳酸盐等	智利 Atacama、玻利维亚 Uyuni、阿根廷 Hombre Muerto、中国扎布耶
伟晶岩型	锂辉石、锂云母、锂磷铝石、透锂长石和锂钠长石等	澳大利亚 Greebushes、中国甲基卡和大红柳滩、刚果金 Manono
黏土型	锂蒙脱石、伊利石	美国 Kings Valley、墨西哥 Sonora
锂沸石型	羟锂硅钠沸石(Jadarite)	塞尔维亚 Jadar
其他卤水型	钾、钠、钙、镁锂的盐类	美国 Smackover 和 Salton Sea
离子吸附型	高岭石、蒙脱石和绿泥石等	贵州大竹园铝土矿

1.1 盐湖卤水型

盐湖卤水型锂矿亦可称为封闭盆地卤水锂矿或大陆盐湖卤水锂矿，是指锂赋存于大陆封闭盆地内盐湖或盐壳中的一种锂矿类型。据统计，全球盐湖卤水型锂矿储量约 9170 万吨，资源量约 1.59 亿吨(数据来源:S&P Global MarketIntelligence、各公司技术报告和年报，截至 2020 年 8 月；下同)。该种锂矿类型分布较为集中，主要分布于南美锂三角地区，其次分布于中国西部和美国。

盐湖卤水型锂矿的成因主要是，在封闭盆地，特别是干旱沙漠地区的封闭盆地中，锂在盐湖卤水中发生富集并形成有开采价值的锂矿床(图 1)。

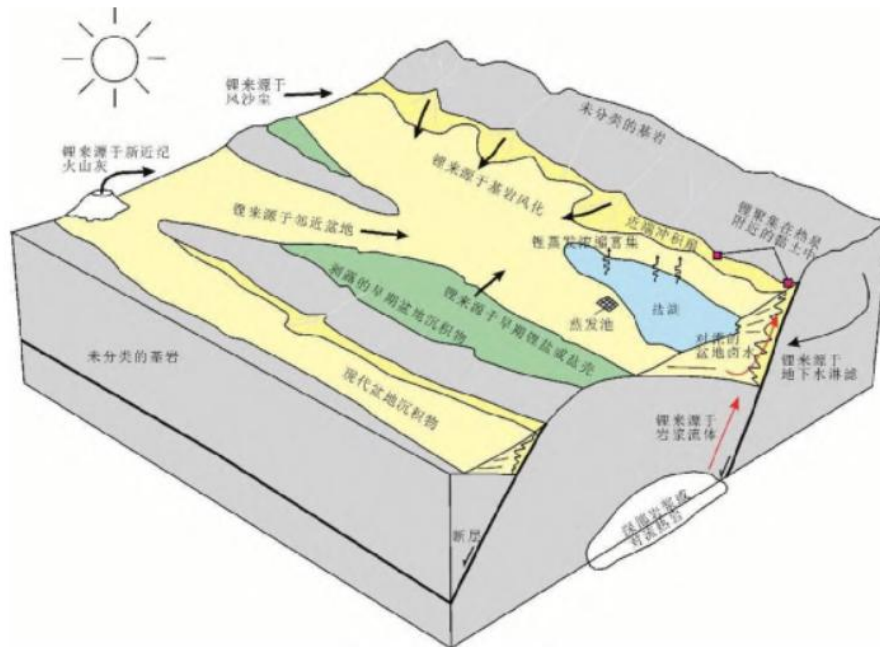


图1 盐湖卤水型锂矿成矿模式示意图

盐湖卤水型锂矿的成矿要素主要有 6 点：

(1) 干旱的气候，这是最重要的因素，直接影响了盐湖的形成、锂浓缩富集成矿的时间和后续提取锂时卤水在蒸发池中进一步蒸发浓缩的效率。

(2) 有盐湖(或盐壳)分布的封闭盆地, 这是目前所有盐湖卤水型锂矿都具有的特征, 这一特征受构造背景和气候条件共同控制。

(3) 与成矿相关的火山或地热活动，这一要素对形成盐湖卤水锂矿十分重要，与之相关的热液可以对锂进行淋滤富集和运移，而浅部热液更是可以直接成为锂源；热活动导致的蒸馏作用也起到了一定的锂浓缩富集作用；早期热液活动形成的富锂黏土矿物是锂源岩之一；火山岩，尤其是玻璃质碎屑成分，是重要的锂源(图1)。

(4) 构造导致的沉陷，已知的盐湖卤水锂矿均位于与伸展、走滑和挤压等造山活动相关的盆地内，如与南美安第斯造山带相关的锂三角地区、北美科迪勒拉造山带相关的美国西部盆地和与青藏高原相关的中国西部青藏地区，盐湖均位于受构造控制的山间断陷盆地内，盆地内部的活动构造及构造沉陷是重要的容矿、导矿机构。与之相反，克拉通内盆地尚未发现具有重大经济价值的盐湖卤水锂矿。

(5) 充足的成矿锂来源，关于盐湖卤水中锂的来源，至今尚无定论，前人的研究成果主要集中于以下四个来源：(a) 新生代火山岩的风化作用和地下地表水淋滤以及卤水的循环富集；(b) 古生代岩石的风化作用及地下水和地表水淋滤；(c) 早期锂盐或盐壳沉积的活化、循环；(d) 热液活动（岩浆、火山和地热等相关流体），热液可以直接成为锂的来源，也可以通过淋滤围岩，尤其是对火山岩中锂进行提取富集。

(6) 盐湖卤水需经历长期的浓缩富集，盆地中最初的含锂流体（盆地内径流、地下水等）锂离子含量极低（1~10mg/L，甚至更低），需要经过几个数量级的富集形成含矿卤水（锂离子含量至少 100mg/L）。此外，不论卤水浓度到达多少，一个具有经济价值的盐湖卤水锂矿的形成，必须要有足够的时间来积累足量的可供开采的锂。盐湖卤水从淋滤、运移到浓缩、汇集成矿所需要的时间目前尚未明确，但其成矿时代几乎均为新生代。

卤水型锂矿由于其产出环境的气候、构造、自然地理等条件的独特性，其在全球的分布较为集中，空间上主要位于南北纬 19°~37°之间。大地构造背景上则主要位于板块碰撞形成的加厚地壳岩浆造山带内，地壳的增厚在减小地幔楔熔融程度的同时可以促进岩浆在地壳内的分异，使锂在初始弧岩浆和地壳内富集，为盐

湖卤水型锂矿的形成提供充足的锂来源；碰撞导致的地壳隆升则是陆内伸展盆地和干旱气候形成的重要因素；这些有利条件的耦合最终控制了盐湖卤水型锂矿的形成，如南美的安第斯山和中国的青藏高原。

1.2 伟晶岩型

伟晶岩型锂矿是指锂赋存在锂辉石、透锂长石、锂云母、锂霞石和磷铝锂石等含锂矿物中，成矿与花岗岩结晶分异形成的伟晶岩有关，其容矿围岩主要为花岗伟晶岩、花岗岩等花岗岩类，但一些矿床亦可赋存于基性岩杂岩体中。

据统计，全球伟晶岩型锂矿储量约 3189 万吨，资源量约 6459 万吨。该类型锂矿在全球分布最广泛且空间分布不均匀，既可以出现在稳定克拉通内，也可以出现在活动性很强的造山带，大型超大型矿床既分布于太古宙的克拉通内、元古代的褶皱带，也分布于古生代的褶皱造山带，还可以出现在新生代的造山带尤其是青藏高原的北部、东北部。大多数含锂伟晶岩赋存于高绿片岩相-低角闪岩相的表壳岩中，位于造山带内部，与 S 型花岗岩关系密切，是板块碰撞汇聚过程中加厚地壳熔融的产物，一般在造山运动后期侵位，受构造控制。伟晶岩多具内部分带结构（也存在内部组构均匀的伟晶岩），主要包括边界带、壁带、中间带和核部带，边界带与壁带中的细粒和 UST（单向固结结构）是液相线过冷所致，中间带与核部带中粗大矿物形成、矿物分带以及稀有金属矿物的饱和结晶是挥发分、稀有金属通过组成带状纯化方式在边界层聚集的结果。该类型矿床中锂主要来源于熔融形成 S 型花岗质熔体的泥质沉积物（云母是锂的主要储集物），由于其为强不相容元素，在熔体的结晶分异过程中逐渐富集成矿（岩浆演化最晚期的伟晶岩或花岗岩）。伟晶岩型锂矿的成矿峰期分别为

2638Ma、1809Ma、962Ma、485Ma、309Ma、274Ma 和 97Ma，与碰撞造山活动和超大陆汇聚的时间一致。

1.3 黏土型

黏土型锂矿是指锂赋存于黏土层（岩）中，主要为蒙脱石族和伊利石族等黏土矿物中的矿床，含锂矿物最主要的类型为锂皂石和锂云母等。黏土型锂矿的成因目前尚未明确：Stillings 和 Morissette (2012) 通过对美国西部黏土型锂矿中的富锂黏土进行的分析表明，除锂之外，它们还富含镁、氟等热液作用的产物，因此，部分学者认为黏土型锂矿成因可能是含锂原岩（主要为火山相关火山-沉积岩系）受热液作用蚀变形成；但是，美国内华达州和俄勒冈州交界处的 ThackerPass 地区黏土型锂矿的钻探结果表明黏土中的锂矿化十分均匀，可能意味着富锂黏土的形成与热液活动无关；Castor 和 Henry (2020) 通过对美国内华达州北部 McDermitt 破火山口内锂矿体中同生钾长石进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果显示，成矿比岩浆活动晚了约 1.2Ma，表明黏土型锂矿并非简单的热液成因，封闭的水文系统成岩作用（CHSD）对锂矿化至关重要，锂主要来源于早期的岩浆活动，经早期热液或地下水淋滤富集后，同其他碎屑物质在封闭的火山口湖内沉积成岩成矿，与封闭盆地中富锂卤水的低温形成机制类似。

据统计，全球黏土型锂矿储量和资源量分别为 679 万吨和 1976 万吨。目前，全球发现的具有经济价值的黏土型锂矿主要分布于北美西部盆地（美国和墨西哥），南美洲秘鲁东南部 Falchani 地区凝灰岩中亦赋存上百万吨碳酸锂。黏土型锂矿的矿体是富锂的凝灰岩和黏土，回收锂的方式以硫酸常压淋滤、浸出为主，回收的产品主要是碳酸锂，回收率可达 80%以上。

1.4 锂沸石型

锂沸石型锂矿发现于塞尔维亚的贾达尔盆地 (Jadar) 中, 目前勘探资源量约 232 万吨。部分学者称其为湖相沉积型或湖泊蒸发岩型, 由于黏土型锂矿也多赋存于湖盆沉积中, 但贾达尔盆地内锂赋存在沸石族矿物中, 故本文采用锂沸石型这一命名以示区分。贾达尔盆地中的锂赋存于近年来新认可的沸石族硼锂硅酸盐矿物羟硼硅钠锂石 (Jadarite) 中, 其化学式为 $[\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})]$ 。羟硼硅钠锂石是一种含硼锂硅酸盐矿物, 同时含硼和锂, 是世界少见的一种矿物中能够同时开发硼和锂的特殊矿物, 其锂含量与锂辉石相似。

贾达尔盆地是一个北西-南东向的凹陷盆地, 处于迪纳拉 (Dinarides) 造山带与潘诺尼亚 (Pannonian) 盆地之间。盆地由约 150km^2 的中新世湖相和海相沉积物充填, 沉积于三叠纪与白垩纪岩层之上, 主要岩石类型有页岩、粉砂岩、细砂岩、粗砂岩、碳酸盐岩、蒸发岩以及凝灰岩等。贾达尔盆地内已发现三层锂矿体, 上部和中部矿体在平面上的投影形态为矩形, 下部矿体的投影形态为圆形, 矿体呈板状产出, 长度 250~1000m。上部、中部和下部矿层厚度分别为 6~30m、8~38m 和 9~20m, 羟硼硅钠锂石的含量分别为 10%~20%、5%~10% 和 30%~50%。脉石矿物由方解石、白云石、钾长石、金红石、钛铁矿、黄铁矿和细粒白云母等组成。矿体成矿物质可能来源于凝灰岩, 其成因尚无定论, 可能是含硼的湖水由于其中的硼暂时性地达到饱和, 或者是蒸发速率的改变以及由于热泉水的流入而使硼酸盐发生沉淀, 从而形成硼酸盐矿床。

1.5 其他卤水型

目前主要包括油气田卤水和地热卤水两个亚类，受技术条件限制，勘查和开发利用程度暂时都较低。

油气田卤水锂矿是锂赋存在油气田较深储层中的富锂卤水内的锂矿类型，其卤水中锂离子含量可达几百 mg/L，全球统计资源量约 314 万吨。美国阿肯色州、北达科他州、俄克拉荷马州、得克萨斯州和怀俄明州的部分油田卤水中均发现含有大量的锂，浓度高达 700mg/L。最著名的油气田卤水锂矿位于美国南部得克萨斯州墨西哥湾沿岸地区的 Smackover 地层中，其卤水埋深 1800~4800m，断续分布在地下灰岩孔隙中，卤水累计厚度可达 200m，部分区段锂离子含量高达 692mg/L。卤水被认为是圈闭的海水，在水热条件下逐渐富集锂和其他微量元素而形成。该类型卤水在开发上存在两个缺点：一是卤水通常位于较深的地下（大于 1km）；二是除非该类型卤水矿恰好位于干旱地区，否则无法使用方便廉价的太阳能蒸发法回收锂，因此该类型锂矿目前不是锂矿勘探和开发的重点类型。

地热卤水锂矿是指富含锂硼钾等元素的温热浓盐水溶液，这些流体除了其热能价值，亦是锂的潜在来源之一，其全球统计资源量约 168 万吨。美国已经在加利福尼亚南部的 SaltonSea 地区的地热卤水中回收锂金属，其热卤水埋深 1865~3170m，温度为 270~370℃，卤水化学类型属氯化钙型，锂离子平均含量约 250mg/L，以高钙低镁为主要特征，镁/锂比值很低，为 0.18 左右，硫酸根和碳酸氢根含量很低，富含重金属元素。目前，索尔顿海深部卤水的开采对象主要是地热、金属锌、硅及锂等，根据供卤量估算，索尔顿海每年可回收金属锂 6460~31580t。该类型锂矿由于其埋深较深，资源潜力目前难以评价。

1.6 离子吸附型

该种类型锂矿和铝土矿伴生，与封闭沉积盆地内的黏土型锂矿不同，其成矿与铝土矿的形成关系密切。铝土矿形成于热带、亚热带气候，是含铝岩石强烈风化后原位或迁移再富集的产物，其成矿过程即是锂、稀土、镓、钒、钛、铌和钽等金属元素大量富集的过程。因中国铝土矿资源丰富，位居世界前列，与之伴生的离子吸附型锂矿也逐渐成为锂的重要来源之一，前人在铝土矿中锂的寻找和研究方面做了大量工作，取得了较大成绩，该类型锂矿床已经成为一种具有巨大潜力，不可忽视的矿床类型。

华北陆块和扬子陆块是中国铝土矿主要分布地区，也是最重要的离子吸附型锂矿的潜力区。其中晋中-晋东北、豫西、黔中-黔北和桂西等地的铝土矿含矿岩系中锂超常富集的现象已被广泛发现，部分矿床中的伴生锂甚至达到了独立锂矿床的边界品位。如贵州大竹园铝土矿钻孔样品中氧化锂单孔平均含量大于 0.05%，局部形成富矿地段，氧化锂含量超过 0.1%，最高可达 0.582%，初步估算大竹园铝土矿中锂金属量可达数十万吨，达到大型以上规模。

王登红等（2013）认为锂在铝土矿中一般以吸附状态存在，因此将此类锂矿称为风化壳吸附型锂矿，即离子吸附型锂矿。温汉捷等（2020）则将该类型矿床命名为碳酸盐黏土型锂矿床，认为锂来自基底不纯碳酸盐岩，碳酸盐岩风化-沉积作用是富锂黏土岩形成的主要机制，锂主要以吸附方式赋存于蒙脱石相中。Lingetal.

（2020）通过 LA-ICP-MS 原位分析方法研究贵州西南铝土矿中锂的赋存状态，结果显示锂可能以类质同象的形式富集在蒙脱石中。钟海仁等（2019）通过元素相关性及其黏土矿物结构研究，认为锂和碱及碱土金属元素呈正相关性，和 Zr、Nb 等稳定元素存在特定关系，锂主要以离子交换和离子吸附 2 种形式赋存在高岭石、绿

泥石、蒙脱石等黏土矿物中，存在锂绿泥石并可能含锂蒙脱石等锂的独立矿物。姚双秋等（2020）和凌坤跃等（2021）陆续在研究广西平果上二叠统合山组黏土岩时也指出锂绿泥石存在的可能。这些研究都表明在沉积岩特别是黏土岩中可能存在锂的独立矿物，但铝土矿中是否存在锂的独立矿物尚缺少实际依据。因此，目前该类型矿床中，锂最重要的赋存状态依然是以离子吸附形式赋存在高岭石、绿泥石、蒙脱石等黏土矿物中。

2 成矿时代及分布特征

2.1 成矿时代

现代盐湖卤水中锂储量最为丰富，南美锂三角地区、中国西部和美国的众多盐湖卤水锂矿均主要形成于中新世及之后。全球目前已知的黏土型矿床，如美国的 KingsValley 和 ClaytonValley、墨西哥 Sonora 等矿床均赋存在新近纪以来的湖盆沉积岩或火山口湖沉积层中，塞尔维亚的锂沸石型锂矿贾达尔矿亦是赋存在中新世湖相沉积岩中。其他卤水型锂矿中的油气田卤水和地热卤水也多赋存在新生代以来的稳定盆地中，因为古老的卤水难以保存至今。离子吸附型锂矿形成时代跨越中生代（早石炭世至第四纪），物源、干燥的气候、风化剥蚀时间等是影响锂富集程度的主要因素（图 2）。

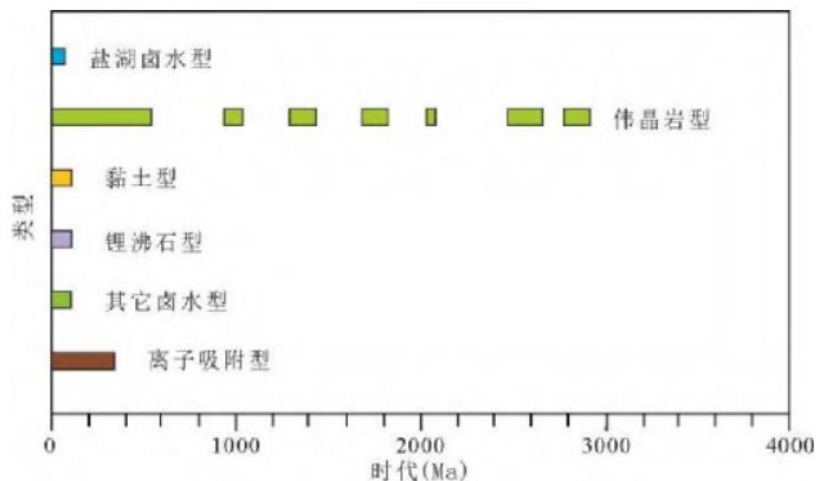


图2 全球主要锂矿时代分布

伟晶岩型锂矿时代分布广泛，跨度较大，目前已知最古老的伟晶岩型锂矿是位于澳大利亚的 Pilgangoora，其铷钽铁矿 U/Pb 年龄为 2879Ma，最年轻的伟晶岩型锂矿是位于意大利的 Elba，其 Rb/Sr 同位素年龄为 7Ma。伟晶岩型锂矿在时代上呈幕式分布(图 2、图 3)，与超大陆形成的汇聚造山时间一致，而在造山运动的间歇期，即超大陆稳定时期，几乎没有具有重大经济价值的伟晶岩型锂矿形成，这些成矿寂静期为 2450~2225Ma、1625~1000Ma 和 875~725Ma。

2638Ma 这一成矿峰期内的伟晶岩型锂矿主要位于西澳克拉通、北美加拿大地盾和南非-津巴布韦太古宙地盾内，代表性矿床主要有西澳最著名的 Greenbushes(2527Ma)、Wodgina(2829Ma)、Pilgangoora(2879Ma)、加拿大的 Tanco(2641Ma)和津巴布韦的 Bikita(2617Ma)等大型或超大型矿床。

1809Ma 成矿峰期内伟晶岩型锂矿主要位于波罗的海地盾和西伯利亚地盾中，该时期的锂矿床数量众多，但是缺乏全球知名的大型矿床。

962Ma 成矿峰期内伟晶岩型锂矿主要位于刚果克拉通内，代表性矿床为形成于 940Ma 的刚果金的 Manono 超大型矿床。

古生代以来的伟晶岩型锂矿的成矿间期明显变短，与加里东运动、海西运动、印支运动和燕山运动的交替发生有关，矿床主要分布于西欧-乌拉尔海西褶皱带、美国阿帕拉契亚海西褶皱带和中国川西锂成矿带中，矿床数量众多，中国四川的甲基卡(208Ma)、党坝和新疆可可托海三号脉(220Ma)等即形成于印支期—燕山期。

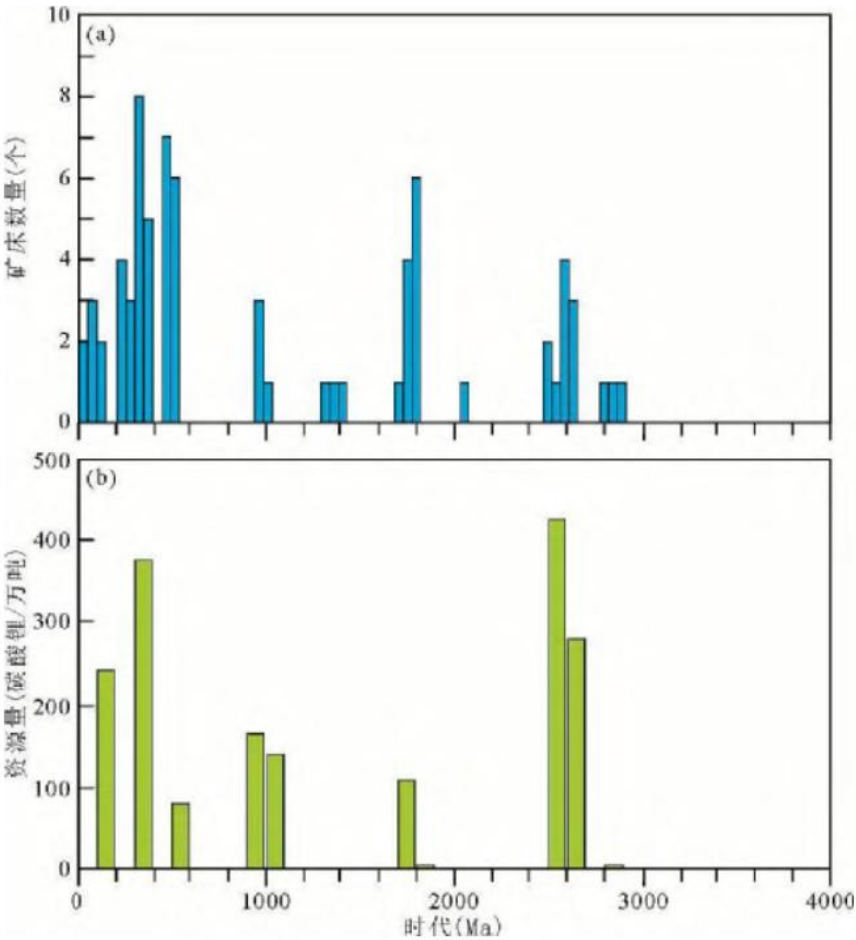


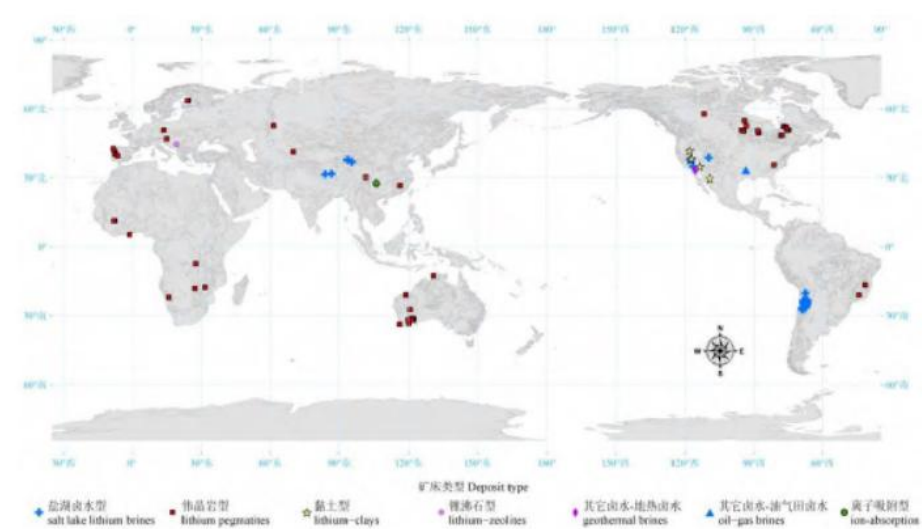
图3 全球伟晶岩型锂矿时代分布特征

全球锂矿床除伟晶岩型和离子吸附型外，均主要位于新生代尤其是新近纪以来的(封闭)沉积盆地中，只有少数零星赋存在中生代沉积层中。根据 Bradleyetal.(2017)报道的数据，新生代锂矿查明的资源量全球占比 75%。新生代之前的锂矿以伟晶岩型为主，中

生代—古生代查明资源量全球占比约 9%，元古宙查明资源量全球占比约 6%，太古宙查明资源量全球占比约 10%。

2.2 分布特征

新老造山带及古老克拉通是锂矿赋存的最佳环境，如青藏高原造山带、南美安第斯造山带、北美科迪勒拉造山带和西澳克拉通等（图 4）。因此，锂矿在空间上主要分布于南美中安第斯的阿塔卡玛沙漠-玻利维亚高原-普纳高原一带，即众所周知的锂三角地区；其次为澳大利亚西澳克拉通的皮尔巴拉地块-伊尔岗地块、中国西部川藏地区、刚果克拉通、西非克拉通马恩-莱奥地盾、北美西部盆地、北美东部褶皱带和地盾区、南非-津巴布韦地盾、波罗的海地盾和西伯利亚地盾、西欧-乌拉尔海西褶皱带、阿富汗帕米尔高原锂潜力区和塞尔维亚贾达尔盆地等（图 4）；近年来铝土矿的分布区也逐渐成为离子吸附型锂矿潜力区，如中国华北陆块和扬子陆块。



2.2.1 锂三角地区

南美锂三角地区位于中安第斯构造带，中新世以来，区域火山活动十分发育，在区内形成了广泛的英安岩和熔结凝灰岩，为锂矿形成提供了物质来源。上新世以来的构造沉降在区内形成大量封闭盆地，由于水岩反应、气候干旱等因素，卤水不断浓缩，各类盐矿物在盐湖内沉淀，锂离子因其较大的溶解度在卤水内不断富集，并在盐田及其周边的沙粒及石盐混层沉积物中赋存，形成了盐湖卤水型锂矿。据统计，锂三角地区具备锂开发潜力的盐湖至少 53 个，总面积超 25000km²。

锂三角地区是全球最大最重要的锂资源集中区，锂储量约 6708 万吨，锂资源量约 1.33 亿吨，已系统勘探盐湖的锂离子平均浓度 600mg/L，Mg/Li 平均比值 9，品质优于全球其他地区盐湖（图 5）。

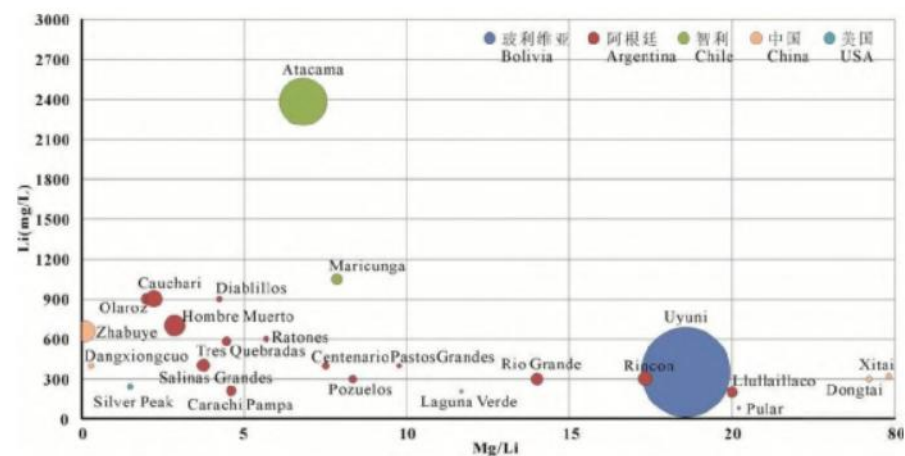


图5 锂三角地区盐湖品质判别对比图

锂三角地区锂资源量最大，品质最好的盐湖为智利的 Atacama 盐湖（图 5），该盐湖表面积约 3000km²，平均锂离子含量约 2380mg/L，最高可达 5000mg/L，该盐湖位于 Atacama 沙漠内，气候极为干旱，十分利于蒸发沉淀法开采。玻利维亚的 Uyuni 盐湖是全球表面积最大的盐湖，约 10000km²，其资源潜力全球第一。

阿根廷的 HombreMuerto、Olaroz 和 Cauchari 盐湖也是全球闻名的优质盐湖（图 5）。

2.2.2 西澳克拉通皮尔巴拉地块-伊尔岗地块

西澳克拉通内的锂矿均为伟晶岩型锂矿，产于克拉通内的太古宙花岗-绿岩带的深变质岩中。富锂伟晶岩多赋存在花岗质片麻岩、角闪岩和角闪石片岩中，而伟晶岩本身多被绿帘石脉、辉绿岩脉和花岗岩脉所穿插。西澳克拉通内几乎包括了整个澳大利亚的锂资源，其锂矿储量和资源量分别约为 1827 万吨和 2897 万吨，是全球伟晶岩型锂矿最大的集中区，是仅次于锂三角地区的锂资源赋存区。克拉通内伟晶岩锂矿常具有伴生组分多、规模大及经济价值高等优点。

西澳克拉通内主要矿床为位于伊尔岗地块的 Greenbushes、MtCattlin、MtMarion 和 BaldHill 等矿床；位于皮尔巴拉地块的 Pilgangoora 和 Wodgina 等矿床（图 6）。其中，Greenbushes 矿是这些矿床的典型代表，位于伊尔岗地块南西。Greenbushes 伟晶岩是西澳克拉通内目前发现的最大的伟晶岩群，沿走向延伸达 6km。Greenbushes 伟晶岩位于 Balingup 变质带内，该变质带由下部角闪片麻岩和上覆的细粒角闪岩及条带状铁建造构成。位于皮尔巴拉地块的 Pilgangoora 矿床亦是一个世界级的伟晶岩型锂矿，Pilgangoora 伟晶岩由一系列沿南北走向断层控制的伟晶岩群组成，分布在 Warrawoona 群镁铁质变质岩系中。Pilgangoora 伟晶岩群可区分为三个岩相，即早期粗粒的含锂辉石相、中期含 Ta-Sn 氧化物的细晶岩相和晚期的含白云母岩石组合。

2.2.3 中国川藏地区

中国锂资源丰富，矿床多，规模大，主要集中在川藏地区（吴学敏等，2016），在湖南、新疆、河南、福建、陕西等省区亦有产出（图 7）。川藏地区锂矿类型主要为盐湖卤水型和伟晶岩型，根据其矿床类型和主要分布区可以划分为川西伟晶岩型锂矿带和青藏高原盐湖卤水型锂矿带。

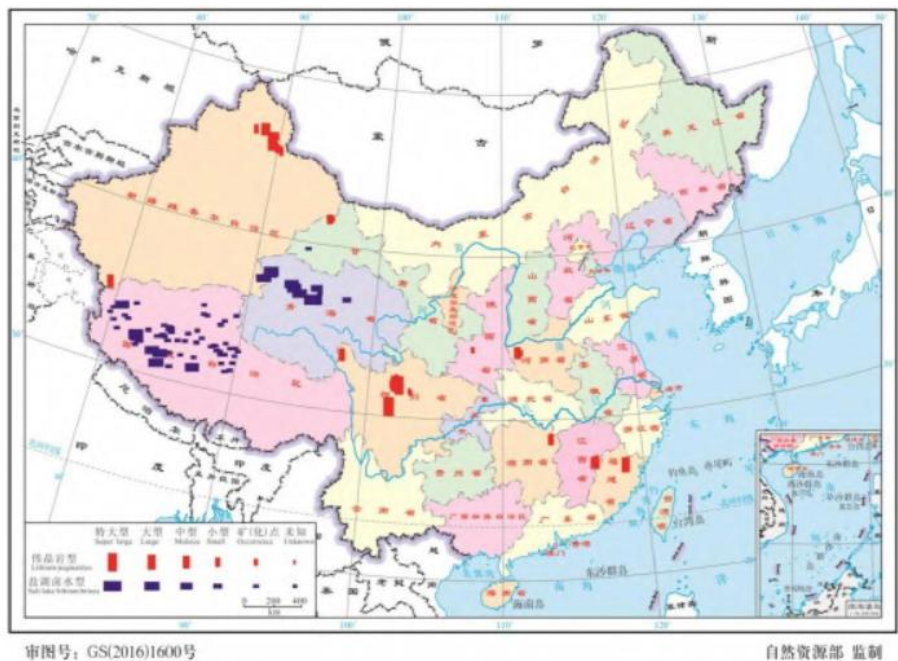


图7 中国锂矿分布概况

川西伟晶岩型锂矿带隶属松潘-甘孜造山带，造山带内伟晶岩型稀有矿产种类多，分布广，已发现的锂矿主要位于造山带主体东缘和西缘（西昆仑大红柳滩锂矿）。带内伟晶岩型锂矿成因上与板块碰撞导致的构造岩浆活动有关，大多数锂矿床，特别是大型锂矿床，形成于岩浆活动中晚期热液蚀变体或伟晶岩脉中。矿带内甲基卡锂矿是亚洲最大的锂辉石矿床之一，印支期含锂二云母花岗岩株沿甲基卡短轴背斜侵入三叠系浅变质岩中。围绕花岗岩内外接触带派生出一系列花岗伟晶岩脉。其主矿体称为新三号

脉，平面上呈分枝脉状，向深部复合为一条巨大的锂辉石矿脉，该矿脉没有明显的矿化分带，主要为细粒钠长石锂辉石结构带，锂辉石呈针状产出，长度一般小于 5mm。

青藏高原盐湖卤水型锂矿带地跨西藏和青海两省（图 7），带内盐湖卤水型锂矿分布较为集中，主要位于青藏高原新生代构造盆地和凹陷中，以扎布耶、察尔汗等盐湖为代表。青藏高原盐湖卤水型锂矿带的形成要素主要为其第四纪以来干旱的气候和高原内部一系列的断陷谷地、盆地构造。其盐湖盆地分为两类：一类为高原北部被大型断裂控制的山间盆地，如柴达木和库里木盆地；另一类为高原内部分布的断裂控制的规模不一的湖盆，或由冰川和河流淤塞形成的小型湖泊。带内盐湖卤水型锂矿的成因与火山、地热活动关系密切。带内的扎布耶盐湖是我国优质盐湖的代表，为富锂碳酸盐型盐湖，面积约 247km²，位于高原腹地。扎布耶盐湖卤水中富含锂、钾、硼、铷、铯、溴等多种矿物元素，锂离子含量在 420~1320mg/L 之间，镁锂比值仅为 0.02，开发条件优良。

2.2.4 刚果克拉通

该区内锂矿均为伟晶岩型，成矿带从乌干达的南西部开始呈北北东—南南西向经卢旺达、布隆迪、刚果（金）进入安哥拉，大致相当于该区中元古代基巴拉构造带（Kibara Belt）及周边稳定克拉通的位置。伟晶岩型锂矿主要产于基巴拉构造带（图 8），基巴拉构造带可分为两部分：北部 Karagwe-Ankole 带（KAB）和南部 Kibaride 带（KIB）。伟晶岩型锂矿主要产于南部 Kibaride 带（KIB），与带内最晚期的含锡花岗岩浆作用关系密切，形成于陆陆造山碰撞晚阶段和碰撞后阶段。伟晶岩的地质年龄为 912~975Ma，侵入早期的变质沉积地层和岩体中，与伟晶岩型锂矿 962Ma 的成矿峰期一致。

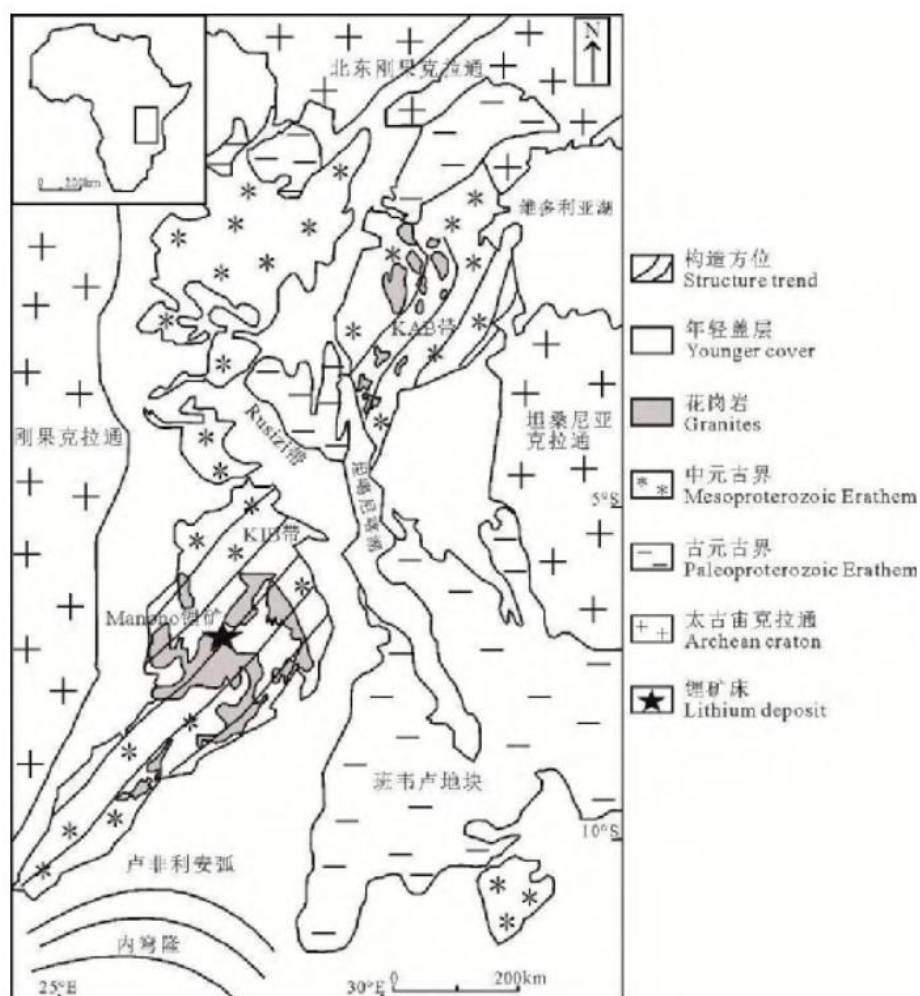


图8 基巴拉构造带地质简图

据任军平等（2021）统计，刚果（金）锂矿的储量约 327 万吨，资源量约 482 万吨，均位居非洲首位。刚果（金）的 Manono 锂矿为刚果克拉通内最大的伟晶岩型锂矿。矿床包括两个矿带：南西的 Kitotolo 矿带和北东的 Manono-Kahungwe 矿带，二者相距约 2km。含矿伟晶岩位于区域花岗岩株的上部，侵入千枚岩、片岩、变质砂岩和变质辉绿岩围岩中。伟晶岩地表风化残积层厚度可达 8m。

2.2.5 西非克拉通马恩-莱奥地盾

西非克拉通马恩-莱奥地盾内锂成矿带自西向东跨越几内亚、马里南部、科特迪瓦、布基纳法索和加纳等国。区内锂矿均为伟晶岩型锂矿，新太古代—古元古代伟晶岩在区内断续分布，构成区内太古宙和古—中元古代结晶岩系的一部分，伟晶岩型锂矿与区内钽、锡等矿床成矿关系密切。区内最大、最典型的伟晶岩型矿床是位于马里南部的 Goulamina 锂矿，是非洲最大锂矿之一，也是最近资源量取得突破的世界级的超大型伟晶岩型锂矿床，矿床包括 Danaya 和桑加尔 Sangar 两个主要矿段，成矿相关伟晶岩侵入到变质沉积岩和绿岩围岩中。

2.2.6 北美西部盆地

北美西部盆地，主要包括美国西部科迪勒拉山系的高山深盆和墨西哥西部的索诺拉（Sonora）沙漠，从美国俄勒冈州沿内华达州、加利福尼亚州南东和亚利桑那州一直延伸至墨西哥索诺拉地区。区内受大规模陆内伸展-岩浆活动影响，形成了众多新近纪以来的火山-沉积盆地，在干旱的气候、盆地沉积作用、火山和热液活动等条件影响下，形成了一系列黏土型锂矿和盐湖卤水型锂矿，全球为数不多的地热卤水锂矿（加利福尼亚的 Salton Sea）在区内也有分布。目前全球发现的具有经济价值的黏土型锂矿几乎全部位于该区域。区内主要的锂产地主要为美国的 Kings Valley、Clayton Valley、Big Sandy 和 Burro Creek 等地区和墨西哥的 Sonora 盆地。

位于美国内华达州北部 Mc Dermitt 地区破火山口内的 Kings Valley 锂蒙脱石矿床是目前发现的最重要的黏土型锂矿之一。Mc Dermitt 地区在中新世有广泛的火山活动，热液渗透入火山岩

中将锂元素提取到湖底形成富锂黏土层，其赋存在火山口湖内火山碎屑岩中。更新世的火山活动将火山口抬高，使得湖水被排出，将富含锂的沉积物带到了地表。

内华达州 Esmeralda 县中南部的 Clayton Valley 是盐湖卤水型锂矿和黏土型锂矿的重要分布区。Clayton Valley 是一个面积 1342km^2 的封闭盆地，洼地处为一个 72km^2 的干盐湖，即为美国现在唯一在产的盐湖卤水锂矿 Silver Peak (Munketal, 2016)。该地区亦发现有高锂含量的黏土层，含蒙脱石的黏土岩全岩矿化，厚度超过 120m。

墨西哥 Sonora 也是目前全球知名的黏土型锂矿，位于墨西哥西部索诺拉沙漠内，美国边境线以南 250km 处。锂蒙脱石富集在索诺拉盆地内几个水平层状黏土层中，盆地沉积主要为平坦的渐新世和中新世沉积物及沉积在浅盆地中的火山岩。黏土层覆盖于砂岩层上，底部为玄武岩。

2.2.7 北美东部褶皱带和地盾区

北美东部地区，主要包括加拿大地盾和美国阿巴拉契亚褶皱带两个区域，是全球重要的伟晶岩型锂矿分布区。阿巴拉契亚褶皱带为海西期褶皱带，带内断续有花岗伟晶岩出露，其中最重要的是 Kings Mountain 伟晶岩带，从北卡罗来纳州南部边界向北东延伸约 50km，宽 0.5~3km。伟晶岩脉产状形态均十分复杂，侵入区域内沉积变质岩，包括石英岩、砾岩、绿泥石片岩、黑云母片岩和片麻岩等，以及石英二长岩中。变质沉积岩内富含硅质的地段抗风化能力强而在地貌上构成山脊，伟晶岩就分布在山脊以西硅质岩石较少的平缓地带。

与西澳克拉通类似，加拿大地盾太古宙绿岩带内亦分布众多的伟晶岩型锂矿。其主要成因是太古宙花岗质岩浆沿断层上侵到绿岩带，经结晶分异形成了近水平的呈透镜状的矿体形态。地盾内产出闻名全球的Tanco矿床和近年来备受关注的Whabouchi矿床。Tanco矿床位于加拿大中部曼尼托巴省的伯尼克湖地区，成矿伟晶岩侵入强烈变形变质的镁铁质变质岩层中，为一条长约1.5km、宽约1km、厚约100m的隐伏岩脉。

2.2.8 其他锂矿分布区

除上述区域外，全球其他地区亦有一定的锂分布，多以伟晶岩型锂矿为主。主要为：南非-津巴布韦太古宙地盾，Bikita矿是其中的典型代表；波罗的海地盾和西伯利亚地盾，地盾内分布一系列伟晶岩型锂矿，但缺乏世界级的典型矿床；南美圭亚那和中巴西地盾，主要分布在巴西境内；西欧-乌拉尔海西褶皱带，包括法国中部、德国西部、捷克和东欧西亚等地区，法国中部的中央高原有海西期含锂、铍、铌、钽的花岗岩产出；阿富汗帕米尔高原锂潜力区，该潜力区锂矿的成矿时代主要为阿尔卑斯新生代成矿期，大规模的褶皱作用对于成矿作用有重要的影响；塞尔维亚贾达尔盆地，目前是锂沸石型锂矿唯一产地（资源量约232万吨）；中国华北陆块和扬子陆块内离子吸附型锂矿的成矿潜力也开始受到重视。

3 勘探开发及找矿潜力分析

目前全球锂矿的开发类型主要为伟晶岩型锂矿和盐湖卤水型锂矿。1997年以前，全球锂矿产量主要来自于伟晶岩型锂矿。自1997年盐湖卤水型锂矿提锂技术突破后，智利和阿根廷盐湖卤水

型锂矿产量迅速上升，锂生产成本大幅下降，碳酸锂价格大跌，导致从 2003 年开始，全球锂资源开发格局由原有的伟晶岩型锂矿为主转变为以盐湖卤水型锂矿为主，并一直成为全球锂资源供应的主体（图 9）。2015 年随着新能源汽车对锂需求爆发式增长，锂价格暴涨，伟晶岩型锂矿因其投资周期短、增产快，在市场供应中的地位迅速逆袭，2019 年全球锂产量 42.58 万吨，其中伟晶岩型产量 25.75 万吨，占比 60.47%。盐湖卤水型锂矿的供应量和其巨大的资源量不匹配（图 9）。

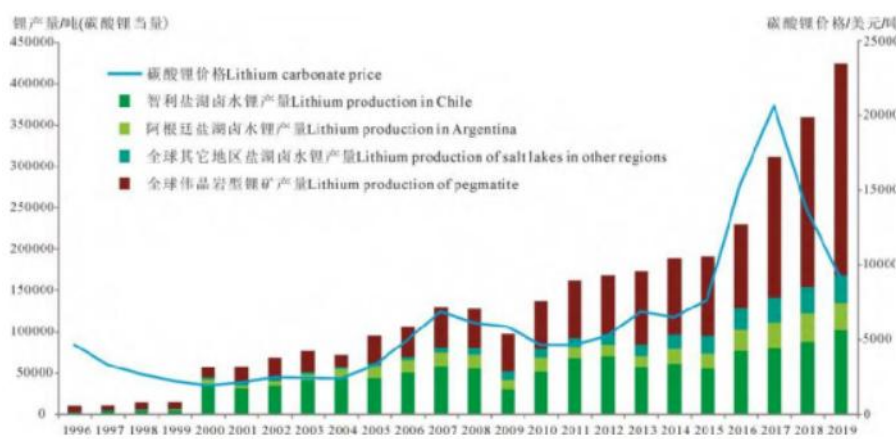


图9 自1996年以来卤水型和伟晶岩型锂矿产量变化图

随着新能源产业的蓬勃发展，全球掀起了锂矿勘探热潮，查明的锂资源量显著增长，各种类型的锂矿均有勘探突破，尤以盐湖卤水型、伟晶岩型和黏土型锂矿最为突出。随着国际市场和国内市场对锂资源需求的跨越式增长，锂资源需求量与供给量超差缺口逐年增长，全球锂矿勘探热潮仍将持续。现有的锂矿类型无疑将成为未来的勘探热点，新的矿床类型也将陆续发现，由于盐湖卤水型锂矿和伟晶岩型锂矿是目前开发利用的主要类型，在未来的一段时间内，这两种锂矿类型仍将是找矿突破最主要的方向，也是勘探和研究的重点。

盐湖卤水型锂矿由于其独特的地理分布特征，锂三角地区、青藏高原和北美西部盆地仍是该类型锂矿最具找矿潜力的地区，尤

以锂三角地区潜力最大，因其成矿条件优异，但勘探和研究程度十分低下，还有许多尚未系统勘探的盐湖，以玻利维亚为例，其高原南部分布至少十几个可开发盐湖，但仅有 Uyuni 盐湖南部一小片区域取得了勘探储量，勘探面积仅为 Uyuni 盐湖的 5%。智利和阿根廷目前开发的盐湖也仅为所谓的“三湖四矿”（智利 Atacama 盐湖两个生产项目、阿根廷 Hombre Muerto 和 Olaroz 盐湖各一个生产项目），尚有大量盐湖未进行系统勘探。Atacama 盐湖现有储量 5191 万吨，资源量 5239 万吨，按现有的开采量可持续开发几百年，根据 Munk 等预测数据，单其一个盐湖的锂储量可满足全球约 50 年的锂需求。整体来看，盐湖卤水型锂矿，尤其是锂三角地区的锂矿，由于其巨大的资源量及资源前景，是保证未来全球锂矿稳定供应最重要的锂矿类型。

伟晶岩型锂矿全球分布较为广泛，太古宙-中元古代的克拉通和北美、欧亚显生宙造山带均可成为找矿目标区。其中，非洲锂矿开发进度缓慢，主要是由于前期勘探和投资严重不足，随着 Manono 和 Goulamina 等超大型矿床的陆续发现，非洲大陆成为全球关注的伟晶岩型锂矿找矿潜力区，尤其基巴拉造山带和马里南部地区，花岗岩边缘形成了很多锂-铯-钽型的伟晶岩，是未来伟晶岩型锂矿十分重要的找矿潜力区。

黏土型、锂沸石型、其他卤水型锂矿现阶段开发利用程度不高，目前这些类型的锂矿床主要分布在勘查程度较高的美国西海岸地区和欧洲。黏土型锂矿是目前除盐湖卤水型锂矿和伟晶岩型锂矿外最受关注的锂矿类型，已勘探资源量也较为可观，但目前该类型锂矿总体的勘探程度不高，根据其成因特点，全球众多的新生代盆地蕴含了巨大的找矿潜力，而盐湖卤水型锂矿分布区也都可能发现该类型锂矿床。由于该类型锂矿锂提纯分离技术相对简单，

回收率高，生产成本低，又具有不可估量的找矿潜力，可能会对
未来全球锂矿原材料供应格局产生颠覆性影响。

锂沸石型锂矿虽然目前全球分布十分局限，但其具有矿床规模
大、分布稳定、开发利用成本低的特点，富含巨量的硼使得该类型
矿床具有巨大的综合开发利用价值，贾达尔盆地和其附近土耳其
的盆地是该类型矿床的重要勘探区，因此，该类型矿床的开发
及找矿潜力不容忽视。

其他卤水型锂矿中的油气田卤水亚类和地热卤水亚类均是多
种能源物质的载体，综合利用价值高。随着传统盐湖卤水型锂矿
的消耗和工业技术的发展，其他卤水型锂矿无疑将成为未来全球
锂矿勘探开发的补充方向，但是目前受制于勘探开采技术，大规模
开发利用在一定时期内尚无法实现。

离子吸附型锂矿与铝土矿相伴产出，互为找矿标志，其锂资源
潜力区的圈定主要由矿体顶底板的铝土岩或黏土岩以及低品质铝
土矿矿石的分布特征决定，而这些正是铝土矿开采过程中产生的
无用尾矿，由于锂矿矿体并不比铝土矿矿体薄太多的特点，因而
找矿潜力巨大，对其加以利用不仅能进一步提高铝土矿矿山的价
值，还能为治理铝土矿矿山环境污染及缓解我国锂资源短缺状况
作出贡献。因此，离子吸附型的锂有可能成为中国锂资源开发利
用的一个重要发展方向。

4 结语

(1) 锂矿的主要类型分为盐湖卤水型、伟晶岩型、黏土型、锂
沸石型、其他卤水型（油气田卤水和地热卤水）和离子吸附型 6

大类，盐湖卤水型和伟晶岩型是最重要的锂矿类型，南美锂三角地区和西澳分别是盐湖卤水型和伟晶岩型分布最集中的地区。

(2) 锂矿时代分布呈高度集中的特点，主要形成于新生代，其次主要分散于前寒武或古生代。新老造山带是锂矿的最佳赋存环境，如青藏高原造山带、南美安第斯造山带、北美科迪勒拉造山带、基巴拉造山带和各古大陆碰撞汇聚造山带。

(3) 盐湖卤水型和伟晶岩型锂矿是现阶段勘探开发的主要类型，黏土型和锂沸石型锂矿开发和找矿潜力巨大、其他卤水型（油气田卤水和地热卤水）锂矿是未来勘探开发的补充方向，离子吸附型锂矿则对中国锂矿开发意义重大。

致谢：南京地质调查中心陈世忠研究员对文稿进行了认真审阅和修改；两位审稿专家和编辑提出了宝贵修改意见。在此一并表示真挚的感谢！