



地热型锂资源： 绿色能源的新篇章

□ 文图 / 魏帅超 原若溪 张 薇 王贵玲 刘 峰

第一作者简介 魏帅超，助理研究员，主要从事地热地质、地球化学研究工作。近年来主要进行川西富锂地热水形成机制及影响因素的研究。

当前，随着新一轮科技革命和产业变革的加速推进，低碳新能源，如电动汽车电池、风力涡轮机和太阳能电池板等，已迅速崛起为全球竞争的核心领域。这些新能源的持续发展不仅是构建以新能源为主体的新型电力系统的关键，也是实现“碳达峰、碳中和”



＞ 索尔顿海地热发电站

图片来源: World -Energy Media

战略的重要环节。在此过程中，锂，凭借其是密度最小的碱金属元素，又是电位最负、电化当量最大的金属元素，还可与中子反应生成核聚变必要原料“氚”等诸多优势，在推动能源绿色低碳转型上发挥着举足轻重的作用，被誉为“21 世纪的能源金属”“白色石油”。由此，全球范围内掀起了“锂资源热潮”，美国、欧盟、加拿大、

澳大利亚及中国等世界主要经济体将其列为“关键矿产”“战略性矿产”。随着“双碳”不断推进，全球对锂等关键矿产的需求日益攀升。全球锂产量在 2010 年—2020 年期间增加了近两倍，由 2.81 万吨（金属当量）增加至 8.25 万吨。据国际能源署在 2021 年发布的《清洁能源转型的矿物需求》报告预测，至 2030 年全球将面临约 50% 的锂需求缺口。据估计，若维持现有开采政策，到 2050 年，锂的需求量将增长 18 ~ 20 倍；然而，倘若实施新的、更可持续的开采政策，预计到 2050 年，锂需求量将增加 40 倍。这一趋势不仅凸显了锂电池在全球能源结构转型中的关键地位，也预示着未来锂资源争夺战的激烈程度。目前，盐湖型、硬岩型锂矿及新类型锂矿，如锂云母型、黏土蒙脱石型、煤层相关型、油田卤水型、地热型等都有新的找矿突破，其提取技术也突飞猛进，有的已经实际应用，这些都将缓和供需矛盾。

锂矿床通常可以划分为卤水型、硬岩型和黏土型三种，三者占全球锂资源的比例分别为 64%、26% 和 10%。其中，卤水型主要分布在南美洲锂三角地区和中国青藏高原；硬岩型主要分布在澳大利亚和中国；黏土型主要分布在北美洲、欧洲和中国。

目前，商业生产的锂主要开采自卤水型和硬岩型锂矿床，如锂辉石，其中，约 62% 的锂来自卤水型，38% 来自硬岩型。位于中国青藏高原与南美洲安第斯高原上的盐湖卤水储层，是提取锂的主要来源。卤水被抽至地表，注入大型蒸发池中，经过约 18 个月的太阳能蒸发，锂浓度得以提升，随后进行化学处理 / 精炼。与卤水型相比，从硬岩型锂资源中提取锂的速度更快，但涉及多种湿法冶金工艺，而且传统的盐湖卤水和含锂硬岩开采过程中容易造成高碳排放、大量水资源消耗及土地污染问题。目前黏土型锂资源的提锂技术尚处于实验室流程试验或实验室扩大连续试验阶段，尚无成熟的工艺流程，这限制了其开发利用。近年来，随着科技进步，全球开始关注一种新型锂资源——地热型锂资源。

资源“新宠” 得天独厚

地热型锂资源独特之处在于其深藏于地球内部，并与地热活动密切相关。这些锂资源主要在地下热水中形成，分布于世界四大主要地热带，即大西洋脊地热带、红海-亚丁湾-东非裂谷地热带、环太平洋地热带和地中海-喜马拉雅地热带，与高温地热资源共存。正因为这一特性，地热型锂资源



> 地热温泉

具有全天候、可持续、低碳和环保等诸多优势，为锂资源的开发和利用开辟了新途径。

值得一提的是，南美洲的地热水锂含量丰富，其含量高达 54 ~ 126 毫克 / 升，这一数值远远超过天然水体。以太平洋海水为例，其锂含量仅为 0.175 毫克 / 升，而长江中的锂含量则微乎其微，仅为 0.0006 毫克 / 升。美国加利福尼亚州帝王谷索尔顿海 KGRA（已知地热区）是全美最大的潜在地热型锂资源区，地热水中锂的平均含量高达 202 毫克 / 升。地质学家对欧洲与地热系统相关的地热水中的锂浓度调查后发现，182 处地热水点中锂含量超过 15 毫克 / 升，确定只有意大利、德

国、法国和英国的 6 个地区的深部流体中锂浓度能达到 125 ~ 480 毫克 / 升。我国西藏雅鲁藏布江沿线的高温地热田也是锂资源宝库，地质学家在这里发现了 15 个锂品位达到或超过工业利用标准的地热水点，锂含量为 20 ~ 239 毫克 / 升，特别是莫洛江、色米、竹墨沙河和日若沸水等地，锂含量明显高于 35 毫克 / 升，显示出极大的开采潜力。

为何这些地热水富集锂元素呢？地质学家经过深入研究发现了这一奥秘。以西藏富锂地热水为例，大约 4 500 万年前，印度板块与欧亚板块的剧烈碰撞不仅改变了地壳结构，也为西藏地区富

锂地热水形成奠定了基础。板块碰撞引发的强烈构造变形导致中—下地壳发生重熔，产生大量重熔岩浆。这些岩浆沿着地壳的缝合带和张性断裂带上升至中地壳，甚至上地壳，形成了不同深度的局部带状熔融体。在重熔过程中，锂等不相容活动元素优先进入流体，并在这些熔融体中富集。随着壳源重熔岩浆流体继续向上运移，它们不断从周围的富锂岩石（如电气石花岗岩）中萃取锂元素，使得锂含量进一步增加；而流体中的相容元素，如一些二价碱金属类、重金属等随着温度、压力下降而沉淀进入固相。当这些高度演化分异的残余流体接近上地壳浅层时，锂元素已经达到极大程度富集。随后，这些富锂的残余流体与通过裂缝下渗的大气降水混合，在壳源重熔岩浆或岩浆囊的加热作用下，形成高温高压地热水。这些地热水最终通过地壳裂缝上升至地表或近地部，形成了我们所见的富含锂的温泉或湖泊。这一过程不仅揭示了地热水中锂元素的来源，也为我们提供了开采利用这些宝贵资源的新思路。

地热提锂 备受关注

地热水提锂技术作为现代科技在资源提取领域的一大突破，已逐渐成熟。这项技术涵盖了浓缩—沉淀法、有机吸附剂应用技术、无机分子筛阳离子交换吸附法、溶剂萃取法、膜分离法，以及电渗析法等多种方法。

沉淀法 这种方法通过改变地热水中的化学环境，使金属以硫化物或氢氧化物的形式沉淀出来。但这种方法并非万能，特别是当金属种类较多时，沉淀物会变得异常复杂，需要进一步处理才能分离出锂。

吸附法 利用特异性吸附剂选择吸附锂，并在一定条件下洗脱，完成提锂过程。目前常用的吸附剂主要有铝基吸附剂、锂离子筛（锰基、钛

基），另外还有含冠醚结构的锂离子印迹聚合物。然而，这些技术都面临使用寿命和吸附性能平衡的问题。

溶剂萃取法 一种从水溶液中分离金属的经典方法，通过特定的萃取剂将锂从地热水中“抓”出来，具有操作简单、经济性好等优点。

膜分离法 利用特殊的膜材料，让锂离子能够“穿”过膜而留下其他离子。然而，目前锂选择性膜的研发尚处于初级阶段，仍需进一步探索。不过，反渗透和纳米滤膜等技术已经在提锂过程中发挥出重要作用，可用于预处理和浓缩含锂卤水。

电渗析法 一种利用电场帮助离子“穿”过膜的分离方法，它通过优化电场和膜材料实现锂的高效提取。然而，离子膜的耐久性问题仍是这项技术面临的挑战之一。

目前，吸附法在国内外地热水提锂产业化项目中已投入商用，而其他方法还处于试验阶段，不过多种工艺的集成耦合将成为趋势。地热水提锂技术虽然取得了显著进步，但仍面临诸多挑战。

探索实践 卓有成效

美国的索尔顿海和德国、法国的上莱茵河谷，是国外地热水提锂项目的两个主要集中地。预计在未来几年内，这些项目将陆续投产，为全球锂资源市场注入新的活力。加州能源委员会对索尔顿海地热田中丰富的碳酸锂储量寄予厚望，预测其年供应量将超过 60 万吨。为了推动从该地热卤水中直接提取锂的经济可行性，加州能源委员会和美国能源部相继投入大量资金，资助相关研发项目。由巴菲特创建的伯克希尔·哈撒韦公司也积极涉足这一领域，其专有的离子交换工艺已在示范工厂成功生产出碳酸锂和氢氧化锂，并计划于 2024 年实现商业化运作。Energy Source 公司

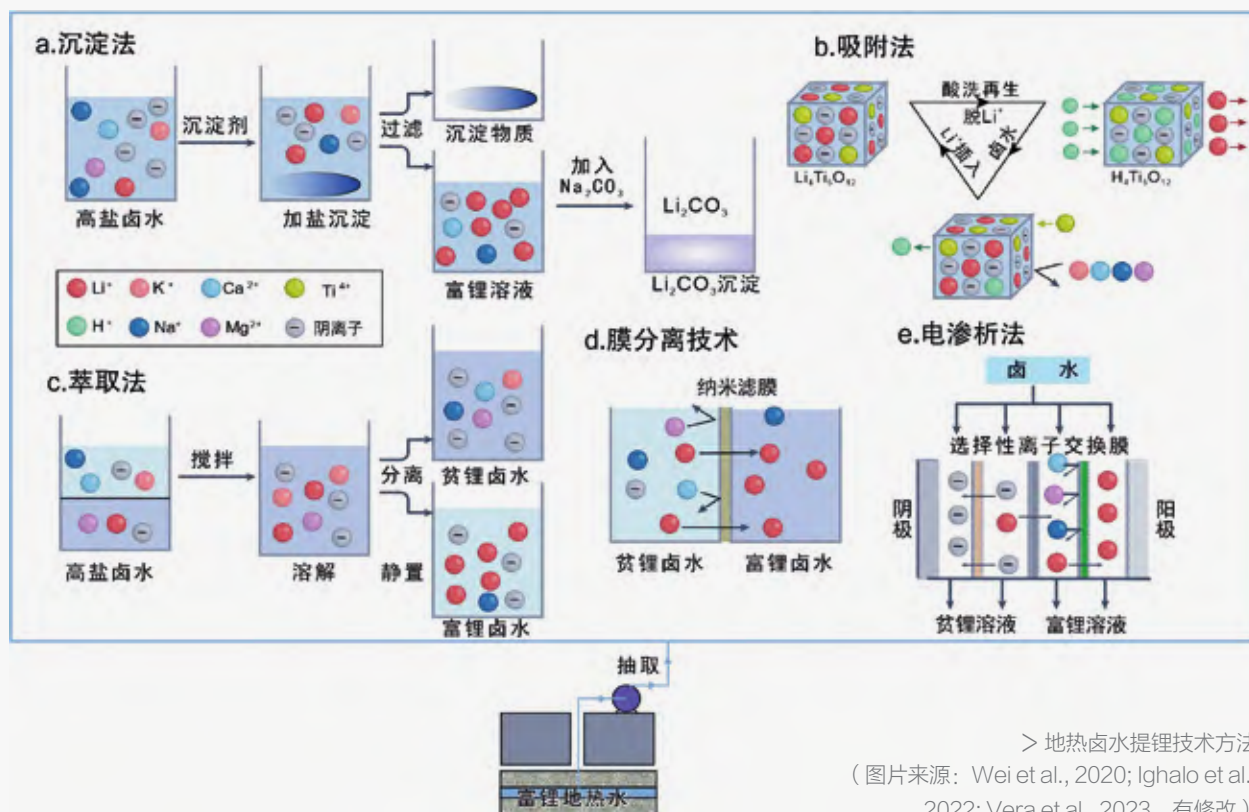
针对索尔顿海地热卤水，开发了一种名为“集成锂吸附解吸”的创新性锂萃取技术，实验结果显示，该技术能够以高达 90% 的回收率生产出纯度为 99.9% 的高品质锂产品。德国的 Vulcan Energy Resources 公司和法国矿业巨头埃赫曼公司也在上莱茵河谷深层地热卤水提锂领域取得显著进展：Vulcan Energy Resources 公司采用原卤吸附技术直接从深层地热卤水中提取锂，并将尾液回注地下，以实现资源的可持续利用，该项目规划年产氢氧化锂 4 万吨，并计划于 2024 年分阶段投产；埃赫曼公司则采用直接锂萃取工艺，并计划于 2024 年第二季度开始电池级碳酸锂的工业生产，预计在 2025 年中期产量达到每年 2.4 万吨。

中国的地热提锂技术相较于欧美国家尚显滞后，科学家们为缩短差距，积极探索、更新和实

践这一技术。有学者提出了一种基于新型磷酸铁锂电化学技术的地热水锂回收方法，回收率高达 90.65%。万里新能公司于 2023 年在西藏某地热田启动了地热提锂项目，采用吸附法 + 膜法耦合工艺处理地热水，以生产电池级碳酸锂。

“锂热复合” 一举两得

在环保与可持续发展的时代背景下，地热能的利用在新能源领域可谓独树一帜。地热发电和地热提锂的联合开发，即“锂热复合”开发，进一步展现了这一清洁能源的巨大潜力和竞争力。地热发电，是一种利用低价热能产生电力的高效环保的能源生产方式，在联合开发过程中，热电厂通过地下开采并将富锂的深层地热卤水带到地表，利用其中的热能产生蒸气，推动涡轮机发电。地热提锂，则



> 地热卤水提锂技术方法

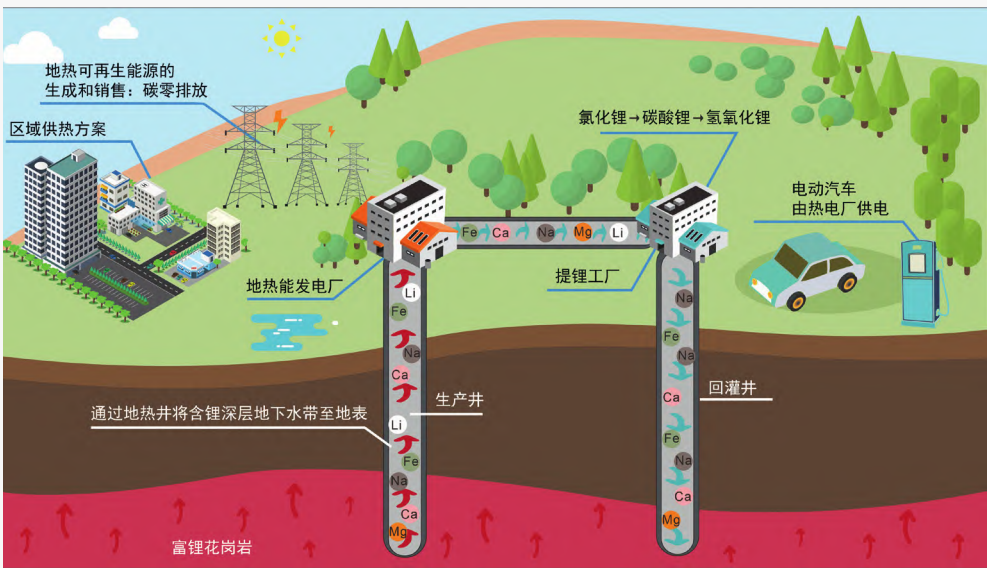
(图片来源: Wei et al., 2020; Ighalo et al., 2022; Vera et al., 2023, 有修改)

是从地热水中提取出宝贵的锂资源，通过专业的提锂工厂，从富锂地热水中分离出氯化锂，并进一步转化为碳酸锂和氢氧化锂等锂产品，同时，分离锂之后的地热水通过回灌井重新注入热储层。这种锂热复合开发模式过程封闭，不仅不排放任何有害物质，

而且运行稳定可靠，为区域供热和电动汽车供电提供了可持续的能源解决方案。

锂热复合实现了能源利用和资源提取的双重效益。一方面，地热发电为区域供热和电动汽车提供了清洁、可持续的能源；另一方面，地热提锂为新能源产业提供了重要的原材料。这种联合开发模式，不仅提高了地热能的利用效率，也促进了资源的循环利用和可持续发展。从环保角度来看，地热发电与地热提锂的联合开发利用也具有显著优势。整个过程中，碳排放量极低，对于减缓全球气候变化、改善环境质量具有积极作用。同时，通过科学规划和合理利用，我们还可以避免对地下水资源的过度开采和破坏，实现地热能的可持续利用。随着科技的不断进步和应用的逐步深入，相信这一领域将迎来更加广阔的发展前景。

在全球新能源转型和“双碳”目标下，地热型锂资源的开发利用将成为推动能源结构绿色低碳转型的关键。这种资源不仅能稳定供应高质量锂资源，其低碳环保特性也有助于实现更清洁、高效的能源利用。地热型锂资源的开发能够促进



> 锂热复合开发模式（图片来源：Geocubed，有修改）

地区经济发展，带动相关产业链，创造就业机会。重要的是，它有助于提升国家能源安全和资源保障能力，降低对外部资源的依赖。因此，加强地热型锂资源的战略规划和开发，对推动绿色能源发展、地区经济和国家能源安全都具有重要战略意义。我们应积极发挥科技创新作用，推动地热型锂资源的开发利用。

本文由中国地质科学院“基本科研业务费（编号：JKYKP202306）”、厦门市“自然科学基金（编号：3502Z202372111）”、中国地质科学院水文地质环境地质研究所“基本科研业务费（编号：sk202212）”和中国地质调查局“地质调查项目（编号：DD20221676）”联合资助。

第一作者单位 / 中国地质科学院
水文地质环境地质研究所

（本文编辑：何陈临秋）