

我国地热水中锂元素分布特征及资源开发利用

魏帅超^{1,2}, 张薇^{1,2}, 付勇³, 刘峰^{1,2}, 原若溪^{1,2}, 闫晓雪^{1,2}, 廖煜钟^{1,2}, 王贵玲^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄, 050061; 2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 石家庄, 050061; 3. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳, 550025)

摘要: 【研究目的】近年来, 锂在新兴技术和低碳技术产业需求增长迅速, 已成为全球主要经济体的关键矿产。尤其在“双碳”目标下, 我国对锂资源的需求也日益迫切, 当前锂的安全供应已严重制约了我国新能源产业发展。我国锂资源开发对象以卤水型和伟晶岩型为主, 但地热卤水型也具有一定资源潜力, 因此需要研究我国地热水锂元素分布特征。【研究方法】文章基于前人对全国范围地热水调查和研究的成果, 介绍和讨论我国地热水中锂含量分布特征、影响因素、地热水提锂技术及地热勘查技术。【研究结果】分析了30个省市主要热储中地热水锂含量, 实际计算出1989处地热水锂金属年排放量为789t, 估算我国地热水锂金属年排放量3233t, 显示地热水中锂资源具有一定的潜力。【研究结论】影响地热水锂含量的主要因素为围岩及热储岩石性质、温度、水岩相互作用等, 也发现锂同位素在示踪陆区地热系统来源、水岩相互作用及物质来源方面具有良好潜力。我国富锂地热水富集机制主要分为喜马拉雅地热带型和四川盆地型, 前者与于上地壳重熔型岩浆上涌有关, 后者与地层中膏盐的溶滤有关。此外, 提出未来我国富锂地热水找矿方向集中在青藏高原、四川盆地、江汉盆地等及油(气)田水。“热锂兼探”、“热锂兼采”, 实现资源利用最大化, 多元地热勘查技术也将助力地热产业发展。

关键词: 地热卤水型; 锂含量; 锂同位素; 富集机制; 地热水提锂; 矿产勘查工程; 地热勘查工程
创新点: 1) 分析了30个省份各热储层地热水锂元素特征, 计算了1989处地热水锂金属排量, 估算了我国地热水锂资源潜力。2) 我国富锂地热水富集机制主要分为喜马拉雅地热带型和四川盆地型。3) 总结了地热水提锂技术和地热勘查技术, 并提出了未来富锂地热水的找矿方向。

Distribution characteristics and resource potential evaluation of lithium in geothermal water in China

WEI Shuaichao^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, FU Yong³, LIU Feng^{1,2}, YUAN Ruoxi^{1,2}, YAN Xiaoxue^{1,2}, LIAO Yuzhong^{1,2}, WANG Guiling^{1,2}

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 2. *Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploitation and Development, MNR, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 3. *School of Resources and Environments, Guizhou University, Guiyang 550003, Guizhou, China*)

Abstract: 【Objective】In recent years, lithium has become a key mineral in the world's major economies, as demand has grown rapidly in the emerging and low-carbon technology industries. Especially under the "carbon

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目(编号 DD20221676); 中国地质调查局中国矿产地质志项目(编号:DD20190379); 国家重点研发计划项目(编号 2021YFC2901905); 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)项目资助的成果。

作者简介: 魏帅超,男,1992年生,硕士,助理研究员,从事地热地质、地球化学研究, E-mail:chinascience@163.com;
通讯作者: 王贵玲,男,1964年生,研究员,博士生导师,主要从事水文地质、地热地质及环境地质相关研究, mail:guilingw@163.com。

peaking and carbon neutrality" goals, the demand for lithium resources is also becoming more urgent in China, but the security of lithium supply seriously restricts the development of new energy industry. At present, our lithium resources are mainly developed by the brine type and pegmatite type, but the geothermal brine type also has a certain resource potential. Therefore, it is necessary to study the distribution characteristics of lithium element in geothermal water. **【Methods】** Based on the results of investigation and study of geothermal water in China by predecessors, this paper introduces and discusses the distribution characteristics of lithium content in geothermal water, influencing factors, lithium extraction technology of geothermal water and geothermal exploration technology. **【Results】** It analyzed the lithium content of geothermal water in the main heat storage of 30 provinces and cities, and actually calculated that the annual discharge of lithium metal in the 1989 geothermal water was 789t, and estimated that the annual discharge of lithium metal in the geothermal water was 3233t, indicating that the geothermal water lithium resources have certain potential. **【Conclusions】** It is found that the main factors influencing the lithium content of geothermal water are the characteristics of surrounding rocks and thermal reservoir rocks, temperature, water-rock interaction, etc. It is also found that lithium isotopes have good potential in tracing the sources of geothermal systems, water-rock interactions, and material sources in continental areas. Lithium-rich geothermal water enrichment mechanism in China is mainly divided into the Himalayan geothermal belt type and Sichuan basin type, the former is related to the type in the crust remelting magma upwelling, while the latter is related to the dissolution and filtration of gypsum and halite in the strata. In addition, it is pointed out that the future prospecting direction of lithium-rich geothermal water in China will be concentrated in the Tibetan Plateau, Sichuan Basin, Jiangnan Basin and oil (gas) field water. "Simultaneous exploration of geothermal water and lithium" and "simultaneous mining of geothermal water and lithium" to maximize the utilization of resources, and multiple geothermal exploration technologies will also contribute to the development of geothermal industry.

Key words: geothermal brine type; lithium content; lithium isotope; enrichment mechanism; lithium extraction from geothermal water; mineral exploration engineering; geothermal exploration engineering

Highlights: 1) Analyzed the characteristics of lithium element in geothermal water reservoirs in 30 provinces, calculated the displacement of lithium metal in 1989 geothermal water, and estimated the potential of lithium resources in geothermal water. 2) The enrichment mechanism of lithium rich geothermal water in China can be divided into the Himalayan geothermal belt type and Sichuan basin type. 3) The lithium extraction technology and geothermal exploration technology of geothermal water are summarized, and the prospecting direction of lithium rich geothermal water in the future is proposed.

About the first author: WEI Shuaichao, male, born in 1992, master, research Assistant, majors in geothermal geology, geochemistry; Email: chinascience@163.com

About the corresponding author: WANG Guiling, male, Doctor, senior researcher, research interests include geothermal resources evaluation biomedical processing, utilization of geothermal water resources at deep crust; E-mail: guilingw@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (DD20221676), China Mineral Geology, China Geological Survey Project (DD 20190379), National Key R&D Program Projects (2021YFC2901905), basic research fees of the Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (sk202212).

1 引言

锂金属对于向低碳经济过渡至关重要，是各国在未来竞争的重要资源（Alessia et al., 2021; Tabelin et al., 2021）。与发达国家相比，我国从“碳达峰”到“碳中和”要缩短几十年，

必然会面临经济和社会中各种复杂的问题和挑战 (Liu Zhu et al., 2022)。锂可能是应对这些挑战的关键矿种之一, 但我国锂矿的对外依存度却高达 75% (王登红等, 2021), 锂的安全供应已严重制约了我国新能源产业发展。为了确保国家经济安全、国防安全和战略性新兴产业的发展需要, 我国已在 2016 年将锂列入战略性矿产目录。目前, 卤水型和伟晶岩型锂资源是我国的主要开发对象, 而其他类型如地热卤水型也值得关注 (李建康等, 2014; 王登红等, 2021)。地热系统中, 地热流体与宿主岩石发生水岩作用, 并倾向于造成各种离子的增加, 可能富集锂、硼和砷 (Wiśniewska et al., 2018; Sanjuan et al., 2022)。欧洲、美国等已开展了从地热水中提取锂的研究 (Tomaszewska and Szczepański, 2014; Wiśniewska et al., 2018)。

我国是世界上地热资源储量较大的国家之一, 尤其是西藏南部、云南西部、四川西部等地的高温地热资源丰富 (陈墨香, 1992)。据最新编著的《中国地热志》, 地热水中的锂含量为 0.0003-99.5mg/L (王贵玲等, 2018a, b, c, d, e, f)。根据《矿产资源工业要求手册》换算 Li 边界品位为 24.71mg/L, 部分地热水中的锂含量已超过边界品位, 具有潜在利用价值。可是, 目前绝大部分地热水开采方式仅利用热, 无疑造成了锂的浪费。因此, 亟需开展地热水锂资源的研究、开发和利用。然而, 关于我国地热水的锂元素怎么分布、如何富集? 哪些因素影响地热水中锂的富集? 其富集机制和成矿物质来源等等这些科学问题尚未厘清, 限制了地热水锂的开发利用。基于上述背景和亟待解决的问题, 本文通过整理和应用《中国地热志》(王贵玲等, 2018a, b, c, d, e, f)、《西藏温泉志》(佟伟等, 2000)、《横断山区温泉志》(佟伟等, 1994)、《云南省志·卷二十五·温泉志》(云南省地质志编纂委员会, 1999) 和大量已发表的研究结果, 归纳了全国地热水中锂元素分布、水文地球化学、同位素特征等, 对上述部分问题尝试给予合理解答。本文研究结果不仅能帮助我们了解全国地热水中锂分布特征和富集形成过程, 而且还有助于认识温度、盐度、热储性质和水-岩相互作用对锂富集过程的影响。此外, 也综述了地热水提锂技术、地热勘查方法, 为未来地热水中锂的开发和利用提供重要支持。

2 全球及我国锂资源分布特征

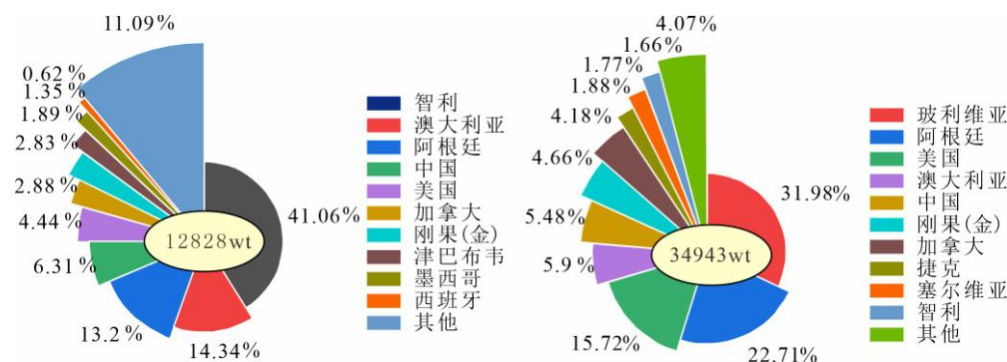


图 1 全球锂矿 (碳酸锂) 储量 (左) 和资源量 (右) 主要分布国家 (数据引自 R 中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心, 2021)

Fig.1 Lithium deposits reserves (Lithium Carbonate Equivalent) (left) and Resources (right) in meanly distributed countries in the Word (data cited from Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, China Geological Survey, 2021)

根据中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心（2021）发布《全球锂、钴、镍、锡、钾盐矿产资源储量评估报告（2021）》，截止 2020 年底，全球锂矿（碳酸锂）储量 12828 万吨，主要分布在智利、澳大利亚和阿根廷等国（图 1），占比近 70%，我国锂矿储量 810 万吨，占比 6.31%；全球锂矿资源量 34943 万吨，主要分布于玻利维亚、阿根廷、美国和澳大利亚等国，占比超过 75%，我国锂矿资源量 1914 万吨，占比 5.48%。

前人按矿床类型主要分为三种：（1）盐湖型；（2）硬岩伟晶岩型；（3）黏土或沉积岩型（Wang et al., 2020; Tabelin et al., 2021）。盐湖型锂矿床主要分布在南美的锂三角（智利、阿根廷、玻利维亚）、中国的青藏高原和美国西部，但这些地区大多处于高海拔的恶劣环境下。伟晶岩型锂矿床广泛分布于世界各地，特别是在澳大利亚西部、中国青藏高原和刚果，与构造带密切相关。粘土型锂矿床在北美科迪勒拉地区巨厚的富锂粘土层中具有更大的潜力（中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心, 2021）。

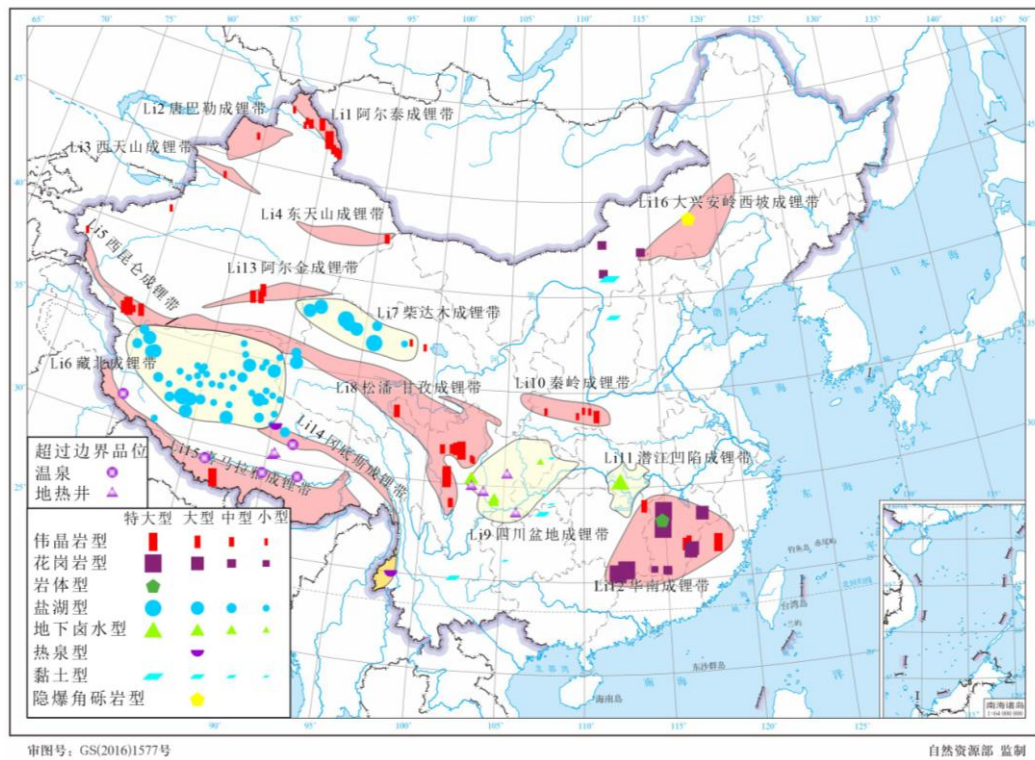


图 2 中国主要成锂带分布图（据王登红等, 2022 修改）

Fig.2 Distribution of main lithium metallogenetic belt in China (after Wang et al., 2022a)

李建康等（2014）、王登红等（2022）对我国锂勘查成果总结，厘定和完善了形成了全国 16 个成锂带（图 2）。近年来找矿勘查成果中，又在贵州大竹园铝土矿、贵州下石炭统九架炉组、滇中下二叠统石头组和桂西上二叠统合山组黏土岩中发现黏土型锂矿（王登红等, 2013; 温汉捷等, 2020; 姚双秋等, 2020），在内蒙古克什克旗维拉斯托发现隐爆角砾岩型锂矿（李泊洋等, 2018），在赣西北富锂-云母化蚀变花岗岩中发现岩体型锂矿，在腾冲热泉发现锂富集并具有潜在找矿意义（郭唯明等, 2019），这些发现进一步拓宽了锂矿找矿方向和远景。根据前人和本次研究对各类型锂矿的研究成果总结了典型矿床或富集层特征，详见表 1。

表 1 我国锂矿类型划分

Table.1 Mail types of lithium resources in China

类型	与成矿相关大地构造特征	地质特征	主要含锂矿物/ 代表性矿物组合	典型矿床	参考文献
伟晶岩型	前寒武纪造山带	片岩-片麻岩等变质岩区内伟晶岩	锂辉石	四川甲基卡、可尔因；新疆大红柳滩	李建康等, 2014; 陈衍景等, 2021; 王核等, 2022
花岗岩型	前侏罗纪多期早造大陆地壳; 板块碰撞造山、陆内变形-岩浆活动	蚀变的钠长石锂 锂云母带、云英岩 化锂云母带	锂云母	江西宜春 414 矿; 湖南道县正冲; 临武尖峰岭	舒良树等, 2021
岩体型	多期岩浆活动	黄玉锂云母碱长花岗岩	磷锂铝石	江西宜丰狮子岭	王成辉等, 2019
盐湖型	陆-陆碰撞作用	碳酸盐型、硫酸盐型、硫酸镁亚型、硫酸钠亚型卤水	扎布耶石、光卤石-石盐	青海察尔汗、大柴旦盐湖; 西藏扎布耶、当雄错	郑绵平和刘喜方, 2010; Liu et al., 2021; 王卓等, 2022
地下卤水型	中生代盆地, 与火山喷发活动密切	硫酸亚钠型、氯化钠型卤水		江陵凹陷、潜江凹陷、吉泰盆地	余小灿等, 2021; 刘成林等, 2021; 朱明波等, 2022
地热水型	陆-陆碰撞作用	花岗岩、变质岩、火山岩		腾冲锂富集区、西藏羊八井、拉多岗、色米、谷露	郭唯明等, 2019; 本文
黏土型	古陆与古洋交汇的过渡环境	铝土矿、煤层中黏土	以吸附形态赋存于蒙脱石	贵州大竹园; 滇中小石桥、观音山	王登红等, 2013; 温汉捷等, 2020
隐爆角砾岩型	古亚洲洋构造域与环太平洋构造域叠加构造	隐爆角砾岩筒云英岩化	锂云母	内蒙古克什克腾旗维拉斯托	李泊洋等, 2018

3 我国地热水锂资源分布特征及锂排放量估算

3.1 我国地热水锂元素分布特征

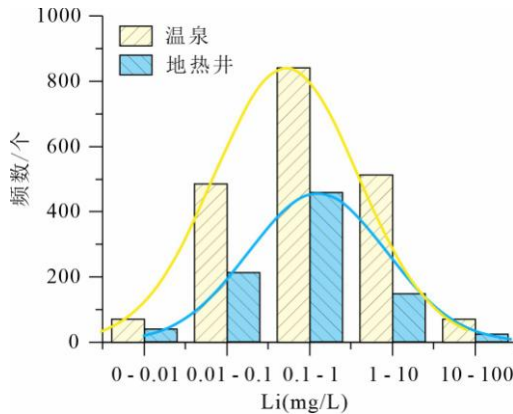


图3 我国温泉、地热井中 Li 含量频率直方图

Figure.3 Frequency histogram of Li content in hot springs and geothermal wells in China

本研究共收集整理了中国陆区 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 包含锂含量在内在有水化学数据的温泉、地热井 2943 处, 由于缺乏数据, 本次研究暂不包括台湾省。根据锂含量频率直方图 (图 3), 锂含量均呈现良好的正态分布, **全国**温泉中锂含量平均值为 $2.10 \pm 4.75 \text{mg/L}$ (中值为 0.32mg/L); **全国**地热井中锂含量平均值为 $1.54 \pm 5.47 \text{mg/L}$ (中值为 0.22mg/L)。根据温泉的经纬度坐标和地理位置进行了投点 (图 4)。为了清晰有效对不同锂含量浓度地热水分布规律进行分析, 根据温泉、地热井锂含量, 结合《矿产资源工业要求手册》换算 Li 边界品位为 24.71mg/L , 按照锂含量 $0-0.01 \text{mg/L}$ 、 $0.01-0.1 \text{mg/L}$ 、 $0.1-1 \text{mg/L}$ 、 $1-5 \text{mg/L}$ 、 $5-10 \text{mg/L}$ 、 $10-20 \text{mg/L}$ 、

≥ 20 mg/L 及 ≥ 24.71 mg/L 区间范围分类。

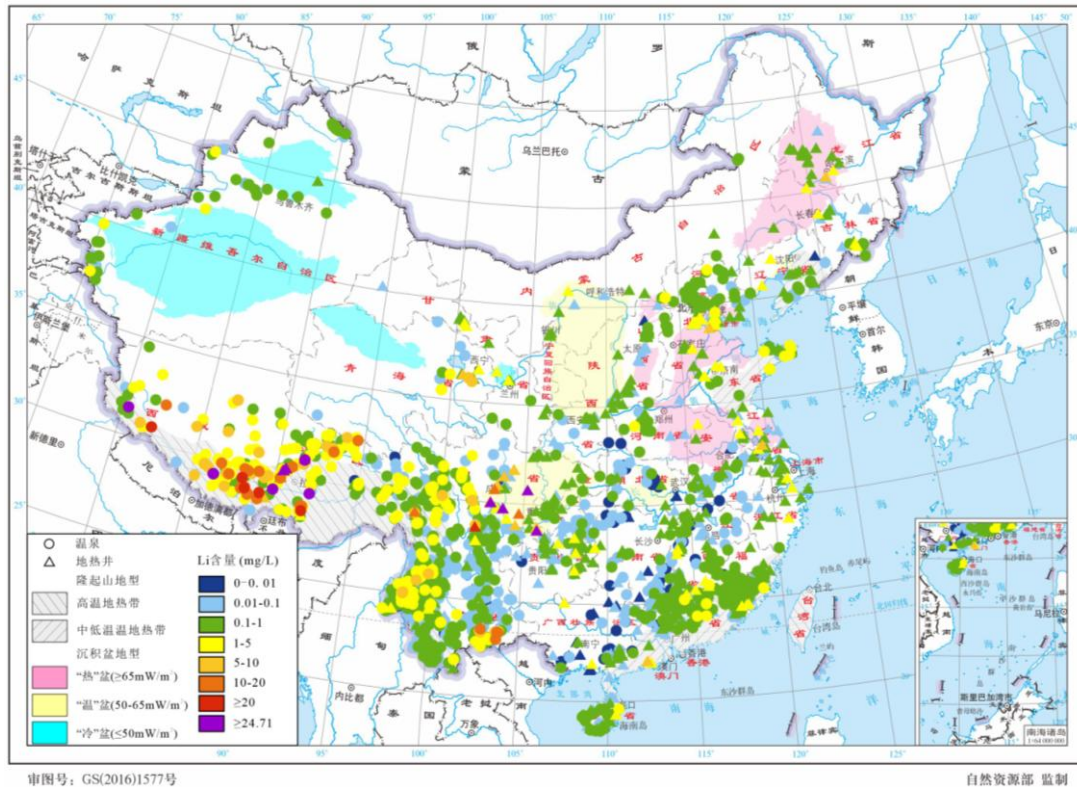


图 4 我国地热水中锂含量与地热储分布（热储层引自张薇等, 2019）

Figure.4 Lithium content and geothermal reservoir distribution in geothermal water in China (geothermal reservoir cited from Zhang Wei et al., 2019)

从地理位置上看, 0-0.01 mg/L 的温泉、地热井主要分布于云南西部、广西东部、南部、湖南西北部、东南部、江西西部、湖北中部及东部和安徽中部。0.01-0.1mg/L、0.1-1mg/L、1-5mg/L 温泉、地热井数据点较多, 在陆区所有省市均有分布, 南方较为密集, 尤其是云南、四川和东南沿海地区。5-10mg/L、10-20mg/L 的温泉、地热井分布范围基本一致, 集中在青藏高原地区。 ≥ 20 mg/L 和 ≥ 24.71 mg/L 的温泉、地热井分别为 39 处、26 处, 集中在西藏南部、四川东部, 按照前人划分的锂成矿带, 分别对应为喜马拉雅成锂带、冈底斯成锂带及四川盆地成锂带 (王登红等, 2022) (图 2)。根据成锂带内地热水中 Li 含量分布, 喜马拉雅成锂带、冈底斯成锂带及四川盆地成锂带中地热水 Li 含量平均值分别为 7.77 ± 8.31 mg/L、 4.55 ± 7.55 mg/L、 4.42 ± 13.65 mg/L, 略高于美国黄石地热水 (3.93 ± 1.52 mg/L) (Cullen, 2020) 低于新西兰陶波火山区地热水 (9.71 ± 3.69 mg/L) (Millot et al., 2012)。

根据全国各省市温泉、地热水中锂含量箱型图 (图 5), 西藏地区温泉和地热井中锂含量均为最高, 均值分别为 5.49mg/L、11.4mg/L, 其次为四川地区地热井、青海地区温泉、山东地区温泉、四川地区温泉、天津地区地热井、广东地区地热井, 均值均超过 1mg/L, 其他省市温泉、地热井锂含量不高, 介于 0.06-0.93mg/L, 湖南地区温泉和河南地区地热井锂含量较低, 均值分别为 0.06mg/L、0.11mg/L。

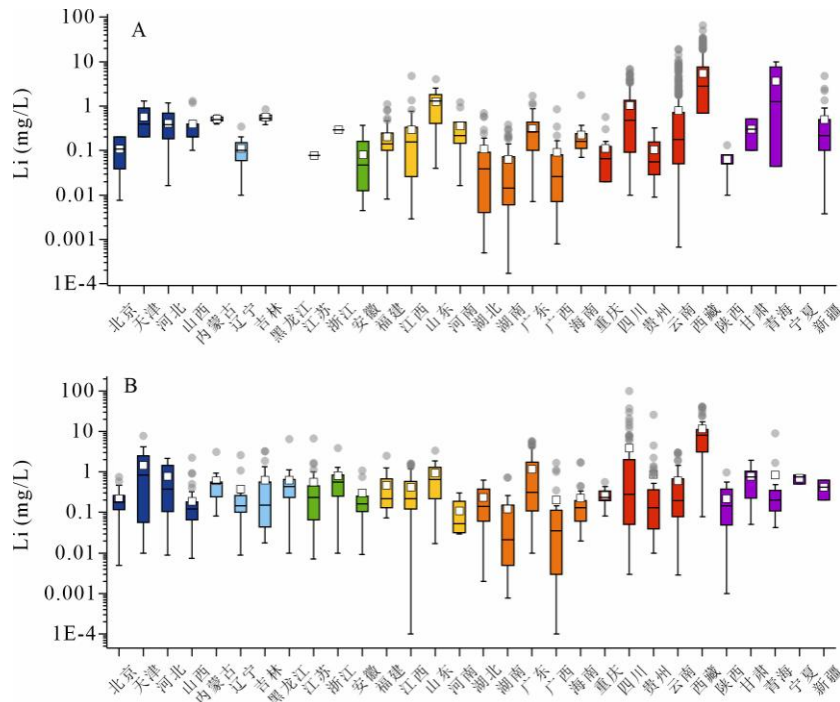


图5 我国各省市地热水锂含量箱型图 (A-温泉; B-地热水)

Figure.5 Box plot of lithium content in geothermal water in different provinces and cities

(A- hot springs; B- geothermal water)

3.2 我国各省市地热水资源分布特征

根据各省市地热资源分布特征及锂含量，描述如下：

(1) 北京：广泛分布碳酸盐地层，主要热储为蓟县系雾迷山组，锂含量均值为 0.24mg/L。此外，燕山期花岗岩裂隙型热储锂含量均值为 0.04mg/L，主要分布在延庆地热田。

(2) 天津：以沉积盆地型地热资源为主，其中，蓟县系雾迷山组热储层热水锂含量最高，均值为 3.442mg/L，其次为奥陶系热储层，均值为 1.90mg/L，寒武系白云岩热储锂含量较低（王 4 井中锂含量 0.625mg/L）（柴蕊, 2006），新近系馆陶组热储地热水锂含量最低，均值仅为 0.041mg/L。此外，隆起山地型地热资源主要分布在盘山花岗岩体花岗岩（印支期）破碎带内，如大孙各庄、官屯地热区（刘杰, 2015; 王贵玲等, 2018a），锂含量均值为 0.557mg/L。

(3) 河北：分为隆起山地型和沉积盆地型，沉积盆地型热储为新近系明化镇热储、馆陶组热储和古生界(奥陶-寒武系)、中-新元古界基岩热储（王贵玲等, 2018a），锂含量均值分别为 0.107、0.038、0.332、1.237mg/L。隆起山地型中第四系、燕山期、元古界白云岩、片麻岩及太古界片麻岩裂隙型热储锂含量均值分别为 0.646、0.36、0.27、0.305、0.46mg/L。

(4) 山西：分为隆起山地型和沉积盆地型，隆起山地型中太古宇片麻岩、伟晶岩热储中地热水锂含量均值为 0.246mg/L。沉积盆地型地热资源中新近系、古近系砾岩、砂岩、泥岩热储层地热水锂含量均值为 0.285mg/L，二叠系砂页岩热储层地热水锂含量均值为 0.052mg/L，寒武系、奥陶系灰岩热储地热水锂含量均值为 0.139mg/L，太古宇、元古宇片麻岩热储地热水锂含量均值为 0.34 mg/L，最高值在阳高、天镇深层地热井，为 2.23mg/L。

(5) 内蒙古：分为隆起山地型和沉积盆地型两种类型，隆起山地型热储岩性为侏罗系凝灰岩、角砾岩等、海西期、燕山期花岗岩、太古界片岩、片麻岩，热储层地热水锂含量均值分别为 0.52、0.632、0.51mg/L，沉积盆地型热储层岩性为新近系中细砂岩、白垩系砂岩、元古界大理岩等，热储地热水锂含量均值分别为 1.155、0.209、0.935mg/L，

(6) 辽宁：分为沉积盆地型和隆起山地型，沉积盆地型中新近系砂岩和砾岩、白垩系流纹岩、砂岩和砾岩、太古宙片麻岩、片岩及大理岩热储层地热水锂含量均值分别为 0.01、0.46、2.6、0.123mg/L；隆起山地型中燕山期、印支期、太古宙花岗岩热储层地热水锂含量均值分别为 0.1、0.09、0.19mg/L。

(7) 吉林：分为沉积盆地型和隆起山地型，沉积盆地型中新近系、古近系、白垩系、侏罗系热储层地热水锂含量均值分别为 0.019、0.14、0.94、1.36mg/L,反映出地层越老，锂含量越高趋势。而隆起山地型中第四纪、侏罗系及元古界热储层地热水锂含量均值分别为 1.07、0.63、0.006mg/L，地热水锂含量均值与地层新老呈负相关性。

(8) 黑龙江：基本为沉积盆地型，最大地热田位于松辽盆地北部的松嫩平原区，热储层岩性为白垩系粉砂岩、泥质粉砂岩及泥岩，地热水中锂含量均值为 0.677mg/L。此外新近系砂岩、古近系碎屑岩及燕山期花岗岩热储层地热水锂含量均值分别为 0.01、0.032、0.01mg/L。

(9) 陕西：以沉积盆地型地热资源为主，其中，新近系砂岩、白垩系砂岩、寒武-奥陶系石灰岩、元古界片麻岩及硅质灰岩热储层地热水锂含量均值分别为 0.23、0.13、0.01、0.05mg/L。此外，隆起山地型地热资源中印支期花岗岩热储层地热水锂含量为 0.05mg/L。

(10) 甘肃：可分为沉积盆地型和隆起山地型，沉积盆地型中侏罗系、古近系、新近系砂岩热储层地热水锂含量均值分别为 0.05、1.15、0.85mg/L。隆起山地型中加里东期、海西期、印支期花岗岩热储层地热水锂含量均值分别为 0.64、0.29、0.509mg/L，另外泥盆系白云质灰岩、三叠系片麻岩、大理岩热储层地热水锂含量均值分别为 0.1、0.1mg/L。

(11) 宁夏：基本为沉积盆地型，以新近系红柳沟组热储资源量最高，其次为古近系清水营组。其中新近系砂岩热储层地热水锂含量均值为 0.695mg/L。

(12) 青海：分为隆起山地型和沉积盆地型，沉积盆地型主要分布在西宁、共和、贵德盆地。其中新近系砂岩、白垩系泥岩、砂质泥岩、砂岩及侏罗系砂岩热储地热水锂含量均值分别为 2.71、0.49、1.7mg/L。隆起山地型热储岩性以印支期花岗岩为主。其中印支期花岗岩、侏罗系、三叠系碎屑岩、石炭系、元古界碳酸盐岩热储地热水锂含量均值分别为 2.88、0.044、0.2、0.12、0.044mg/L。

(13) 新疆：以隆起山地型地热资源为主，其中第四系、古近系、侏罗系、二叠系、志留系、寒武-奥陶系及元古界热储层地热水锂含量均值分别为 0.2、0.02、2.43、0.53、0.42、0.225、0.08、0.438mg/L；喜山期、燕山期、印支期、海西期、加里东期花岗岩热储地热水锂含量均值分别为 0.125、0.178、0.17、0.35、0.14mg/L。此外，沉积盆地型地热资源较少，其中石炭系玄武岩、安山岩热储地热水锂含量为 0.63mg/L。

(14) 广东：分为隆起山地型和沉积盆地型，隆起山地型中加里东期、华力西期、印支、燕山花岗岩热储地热水锂含量均值分别为 0.008、0.314、0.66、0.96mg/L；另外震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、侏罗系、二叠系热储层地热水锂含量均值分别为 0.382、0.317、0.098、0.142、0.225、0.288、0.367mg/L。沉积盆地型中新近系、古近系热储层地热水锂含量均值分别为 0.092、0.096mg/L。

(15) 海南：分为隆起山地型和沉积盆地型，隆起山地型地热资源中燕山期、印支期、华力西期花岗岩、第四系砂砾石、石炭系石英岩及志留系千枚岩热储层地热水锂含量均值分别为 0.17、0.286、0.17、0.298、0.11、1.68mg/L。沉积盆地型地热资源中新近系砂岩热储层地热水锂含量均值为 0.69mg/L。

(16) 广西：可分为隆起山地型和沉降盆地型，以隆起山地型为主，次为沉积盆地型，其中隆起山地型中古近系、侏罗系、三叠系、石炭系、泥盆系、寒武系、燕山期、印支期、加里东期热储地热水锂含量均值分别为 2.06、0.0033、0.114、0.003、0.00047、0.14、0.00055、0.049、0.002、0.06mg/L；沉积盆地型中新近系、寒武系热储地热水锂含量分别为 0.03、0.073mg/L。

(17) 江苏：可分为隆起山地型和沉降盆地型，隆起山地型地热资源中古近系、白垩系、侏罗系、三叠系、石炭系-二叠系、奥陶系、寒武系、震旦系、元古界及燕山期热储地热水锂元素含量均值分别为 0.53、0.096、0.02、0.28、0.3、0.29、0.17、0.189、1.4、0.297mg/L；沉积盆地型中新近系、侏罗系、寒武系热储地热水锂元素含量分别为 0.15、1.57、3.85mg/L。

(18) 浙江：可分为隆起山地型和沉降盆地型，隆起山地型地热资源中侏罗系、寒武系碳酸盐岩及燕山期侵入岩热储地热水锂含量均值分别为 0.5、0.25、0.01mg/L。沉积盆地型地热资源中古近系、石炭系、奥陶系热储地热水锂含量均值分别为 3.94、0.63、1.04mg/L。

(19) 安徽：可分为隆起山地型和沉降盆地型，隆起山地型地热资源中侏罗系、志留系、奥陶系、寒武系、震旦系、太古界、燕山期热储地热水锂含量均值分别为 0.2521、0.009、0.04、0.14、0.039、0.097、0.076mg/L。沉积盆地型地热资源中新近系、白垩系砂岩、粉砂岩热储地热水锂含量均值分别为 0.61、0.749mg/L。

(20) 福建：均为隆起山地型地热资源，主要赋存于花岗岩体裂隙当中，部分存在于火山岩裂隙。其中，白垩系、侏罗系、三叠系、二叠系、寒武系、燕山期、印支期热储地热水锂含量均值分别为 0.139、0.28、0.233、0.152、0.29、0.26、0.5mg/L。

(21) 江西：以隆起山地型为主，其中白垩系、侏罗系、三叠系、二叠系、志留系、奥陶系、寒武系、震旦系、元古宙、燕山期、印支期、加里东期及元古宙花岗岩热储地热水锂含量均值分别为 0.59、0.32、0.011、0.0455、0.23、0.01、0.106、0.239、0.23、0.288、0.003、0.944、0.048mg/L。沉积盆地型热储岩性为二叠系-三叠系碳酸盐岩，地热水锂含量均值为 0.083mg/L。

(22) 山东：可分为隆起山地型和沉降盆地型，隆起山地型地热资源中白垩系安山岩、寒武系灰岩、太古界变质岩、燕山期、印支期、澄江期、晋宁期、元古宙花岗岩热储地热水

锂含量均值分别为 0.845、1.77、1.135、1.588、0.46、1.53、1.41、0.14mg/L。沉积盆地型地热资源中新近系砂岩、奥陶系碳酸盐岩热储地热水锂含量均值分别为 0.182、0.942mg/L。

(23) 河南：可分为隆起山地型和沉降盆地型，隆起山地型地热资源中古近系、寒武-奥陶系、元古宙、燕山期热储地热水锂含量平均值分别为 0.016、0.44、0.75、0.227mg/L。沉降盆地型地热资源中新近系、三叠系热储层地热水锂含量均值为 0.045、1.145mg/L。

(24) 湖北：可分为隆起山地型和沉降盆地型，隆起山地型地热资源中白垩系-古近系、二叠-三叠系、泥盆-石炭、震旦-奥陶系、太古-元古界、燕山期热储地热水锂含量均值分别为 0.003、0.176、0.0005、0.169、0.12、0.062mg/L。沉积盆地型地热资源分布于江汉盆地等，热储岩性为白垩系、古近系及新近系砂岩。

(25) 湖南：均为隆起山地型地热资源，三叠系砂岩、二叠系灰岩、石英砂岩、石灰岩硅质灰岩和白云质灰岩、泥盆系灰岩、奥陶-寒武系灰岩、元古界-震旦系板岩和角砾岩及各期花岗岩热储地热水锂含量均值分别为 0.019、0.006、0.184、0.023、0.045、0.028、0.47、0.225mg/L。

(26) 重庆：均为隆起山地型地热资源，热储层主要为三叠系、二叠系以及寒武系的碳酸盐岩。三叠系、二叠系、寒武-奥陶系热储地热水锂含量分别为 0.235、0.045、0.057mg/L。

(27) 四川：隆起山地型热储中第四系、白垩系、三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系、志留系、元古界片麻岩（碳酸盐岩）、花岗岩、流纹岩、燕山期及印支期花岗岩热储地热水锂含量均值分别为 0.003、0.543、0.47、1.47、0.53、0.31、0.04、0.34、0.32、0.2、1.92、20.86、2.47、0.12mg/L；沉积盆地型热储岩性为三叠、二叠碳酸盐岩，其热储地热水锂含量均值分别为 7.16、4.99mg/L。

(28) 云南：隆起山地型和近期火山和岩浆活动型，分布面积达 95% 以上，中元古界、震旦-三叠系、白垩-古近-新近、第四系及印支期-燕山期热储层地热水锂含量均值分别为 0.54、0.51、0.96、0.0843、2.99mg/L；沉积盆地型零星分布于全省各地，其分布面积小于 5%，其中震旦-寒武系、二叠系热储地热水锂含量分别为 0.22、0.01mg/L。

(29) 贵州：以隆起山地型地热资源为主，其震旦系-三叠系碳酸盐岩、元古界变质岩热储地热水锂含量均值分别为 0.29、0.46mg/L，而沉积盆地型地热资源仅分布赤水、习水县，其二叠-三叠系碳酸盐热储地热水锂含量为 25.8mg/L。

(30) 西藏：以隆起山地对流型为主，热储类型基本为基岩裂隙型深部热储，热储岩性有花岗岩、闪长岩等，属于深循环型地热资源。新近系砂岩、古近系砂砾层、古近统安山岩、白垩系砂岩、侏罗系砂岩、砾岩、三叠系片岩、砂岩、二叠系灰岩、燕山期-喜山期热储地热水锂含量均值分别为 0.48、7.6、2.5、4.5、0.38、3.79、13.31、1.71、1.72、8.25mg/L。

3.3 我国地热水锂排放量估算

利用温泉、地热井的流量和其锂元素含量进行计算出每年地热水中排放出的锂金属量。通过统计我国 1989 处温泉和地热井数据，计算得出地热水锂金属量年排放量为 789t/a，其中西藏地区最高，占比约 75%，其次为云南、四川和天津（图 6）。这是由于西藏、云南、

四川内地热水均属于喜马拉雅地热带，温泉、地热井数量远超我国其他地区，并且锂含量相对较高；而天津部分雾迷山组热储锂含量相对较高，且流量较大，使其锂排放量也相对较高。根据 2017 年成果中统计的我国出露温泉 2334 处和地热井 5818 眼（王贵玲等, 2017），可以初步估算出我国地热水锂金属年排放量为 3233t, 在地热水流量和锂含量保持基本不变的前提下，100 年里地热水锂金属量排放可达 32.33wt，折合成碳酸锂可达 172.10wt，为中国矿产资源报告（2022 年）中我国锂矿储量的 42.5%，可见我国地热水锂资源相当可观！

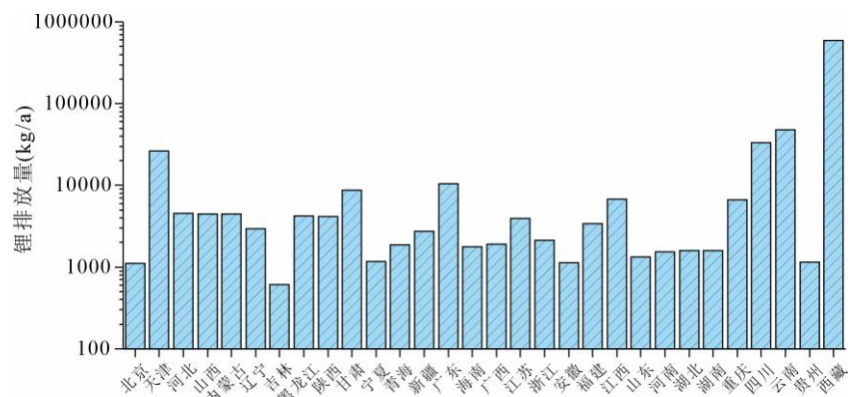


图 6 全国各省市锂排放量柱状图

Figure.6 Histogram of lithium emissions in provinces and cities in China

4 地热水锂地球化学特征及影响因素

4.1 地热水锂含量与地热储分布关系

根据地热水锂含量与全国主要热储分布关系图（图 4）上看，富锂地热水多分布于喜马拉雅地热带附近，最近在该地区还发现的琼嘉岗超大型伟晶岩锂矿（秦克章等, 2022）。该地热带内地热系统属于陆陆碰撞板缘型水热系统，主流观点认为热源为下地壳深融型岩浆区和中部的局部低速熔融体，形成了喜马拉雅地热带独特的水热系统（王贵玲和蔺文静, 2020a）。前人研究发现，地热水中的 Li 除了来自热水上升过程中与富 Li 岩石发生水岩作用淋滤出的外，还可能来源与上升冷却为常态的岩浆参与流体混合或岩浆脱气输入有关（许鹏等, 2018）。此外，四川盆地也分布一些高锂含量地热水，主要储存于三叠系中下统嘉陵江组和三叠系中统雷口坡组碳酸盐岩储层中，岩石组合为硬石膏层夹泥质白云岩。该储层中锂的富集可能是与膏岩层发生水岩作用有关。江汉盆地、潜江盆地、吉泰盆地等也存在富锂热卤水，与火山活动关系密切（余小灿等, 2021；刘成林等, 2021；朱明波等, 2022）。此外，东南沿海、郯庐断裂带及其他盆地如鄂尔多斯盆地周缘、松辽盆地、华北平原等大部分分布为低锂地热水，零星分布有相对较高锂含量地热水。这些地区之所以低锂，很可能与热储层岩性有关，如广泛分布的寒武-奥陶系碳酸盐岩热储层由于地下水流通性较高，补给交替强烈，水岩作用时间相对较短（张薇等, 2019）；华北平原分布着的新近系-古近系热储层为半开启封闭环境，地下水广泛接受现代降水和古降水淋滤，交替强烈，矿化度不高，也不容易形成锂的富集（张薇等, 2019）。

4.2 地热水与全国锂地球化学背景关系

中国锂地球化学背景图（图 7）显示，青藏高原内地热水锂元素含量与锂地球化学异常分布基本一致，尤其在 Li06 异常、Li08 异常区（王学求等, 2020），最近新发现的琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿就处于 Li6 异常区内（秦克章等, 2022），这反映青藏高原内部地热水中锂的富集与其基岩有关；而在我国其他地区如新疆、湖南、东南沿海，锂异常分布区周边地热水中锂含量并未是显著高值，有些还呈现低值，这反映地热水中锂元素的富集与否还受其他条件影响，如水岩作用强度、温度等因素。

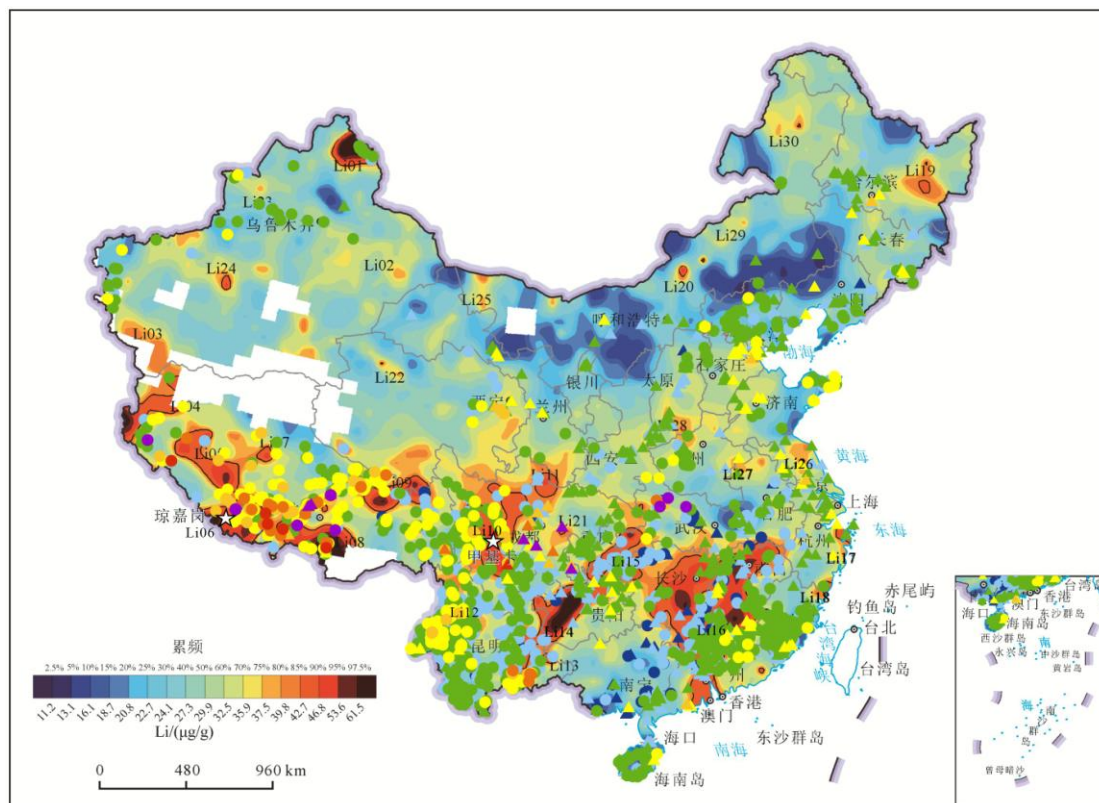


图 7 中国锂地球化学背景图及地热水锂元素含量分布（据王学求等, 2020 修改）

Fig.7 Lithium geochemical map and distribution of lithium in geothermal water in China (modified after Wang et al., 2020)

4.3 温度对地热水中锂的影响

各温度范围内的地热水锂含量与温度两者之间的关系箱型图显示（图 8），锂含量均值和中位值与温度之间呈现良好的正相关关系，反映出温度因素能促进地热水中锂含量的增加。由于 Cl 在自然界水-岩系统中具有保守性，迁移能力强，基本不受水-岩作用及温度影响，因此可以用来判别深部流体特征和水化学演化过程及其他离子来源（Arnórsson et al, 1995; 许鹏等, 2018）。地热流体中 SiO₂ 溶解度为温度的函数，热储温度越高，流体中的可溶性 SiO₂ 越多，而随着流体温度的冷却，SiO₂ 的沉淀析出过程较为缓慢，所以 SiO₂ 能反映热储温度（孙红丽等, 2015）。全国地热水中 Cl⁻、SiO₂ 与 Li 之间的三元散点图（图 9），Cl⁻ 与 Li⁺，SiO₂ 与 Li 含量呈现较为明显的正相关性，当 Cl⁻ 含量增大、温度升高会促进地热流体中 Li 含量的增加，这可能是由于温度升高使水岩作用强度增强，促进 Li 元素从岩石淋滤出来。

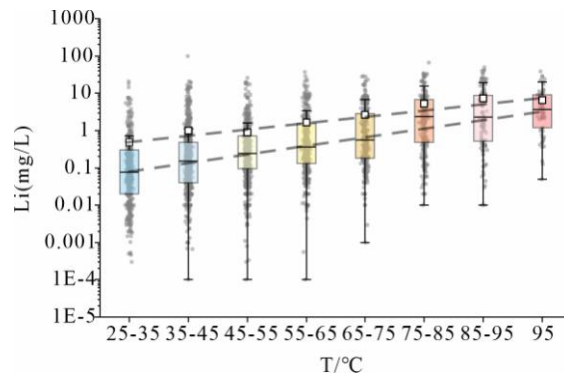


图 8 地热水温度与锂含量关系的箱型图

Figure.10 Box-plot of the relationship between temperature and lithium content in geothermal water

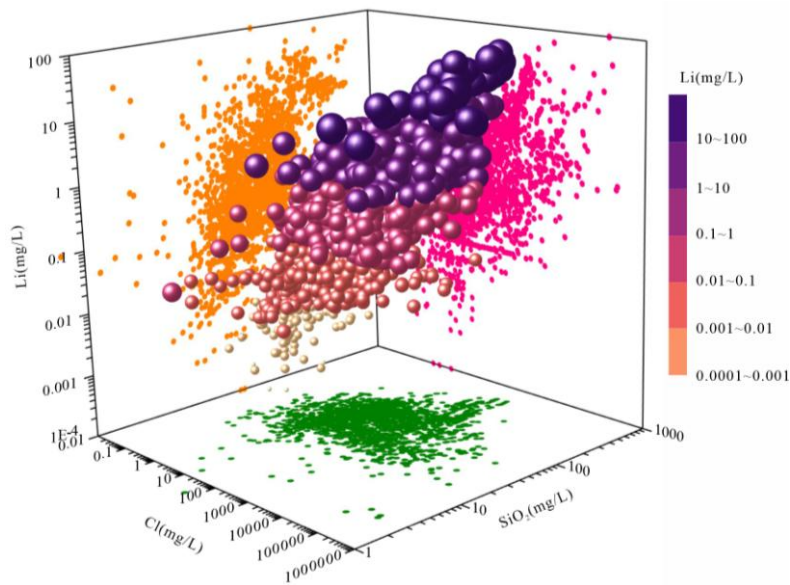


图 9 地热水中 Cl、SiO₂ 与 Li 组分关系的三元散点图

Fig.9 Ternary scatter diagram of the relationship between Cl, SiO₂ and Li components in geothermal water

4. 4 水岩相互作用对地热水锂的影响

自从全球大气降水线 (GMWL, $\delta^2D=8\delta^{18}O+10$, Craig, 1961) 发现以来, $\delta^2D-\delta^{18}O$ 图解常用来确定水的来源与补给、水-岩相互作用及地下水混合作用等水文循环特征 (Pang et al., 2017)。中国大陆的降水线 (LMWL, $\delta^2D=7.9\delta^{18}O+8.2$) 由郑淑惠等(1983) 提出, 为区域大气降水线。全国地热水表现为两种典型的氧同位素分布特征, 一类是氧同位素发生明显漂移, 表现出水岩作用特征, 如西藏色米、谷露地热水, 这可能是由于水岩作用过程中, 水与岩石之间发生氧同位素交换, 导致地热水重同位素富集, 发生氧同位素正漂移。另一类地热水, 如青海三河平原地热水靠近 GMWL 分布, 未发生明显的氧同位素漂移, 推测这类温泉补给循环速度较快, 未发生明显的地热水与岩石的氧同位素交换 (张磊等, 2021)。地热水主要来源于大气水 (Crgig, 1961), 图 10 显示接近 GMWL 的大部分低锂含量地热水和少量高锂含量地热水均为大气水来源, 如四川盆地内部分富锂地热水来源为古大气水, 经过了膏岩层溶滤作用。根据地质特征, 全国的地热水来源可能包括三个端元: 大气水、冰雪融水和岩浆水 (Fig.6)。大气水 δ^2D 含量高于海拔低冰雪融水, 可以补充地热水, 并使地热水的 δ^2D

增加。冰雪融水经过下渗，通过断层迁移至热储层，成为地热水的重要补给来源之一（Guo et al., 2017）。图 10 显示，地热水中的 $\delta^2\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均高于冰雪融水，推测富 $\delta^2\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的岩浆水也可能是地热水的来源之一。除了四川盆地外，其他大部分较高锂含量地热水样品落于三个端元的混合区，如谷露、色米地热水更接近在岩浆水和冰雪融水连线上，认为谷露、色米地热水是冰雪融水和岩浆水的混合来源。而像青海三河平原地热水基本在冰雪融水和大气水连线上，表明是冰雪融水和大气水的混合来源。而处于混合区中间部分地热水可能是岩浆水、大气水和冰雪融水混合。另外，图 10 也显示随着 $\delta^{18}\text{O}$ 发生正漂移，地热水中 Li 表现为含量的增加的趋势。综合上述，我们推测以岩浆水和冰雪融水为混合来源的地热水，会发生较强的水岩相互作用，更容易随氧同位素正漂移而发生锂的富集。

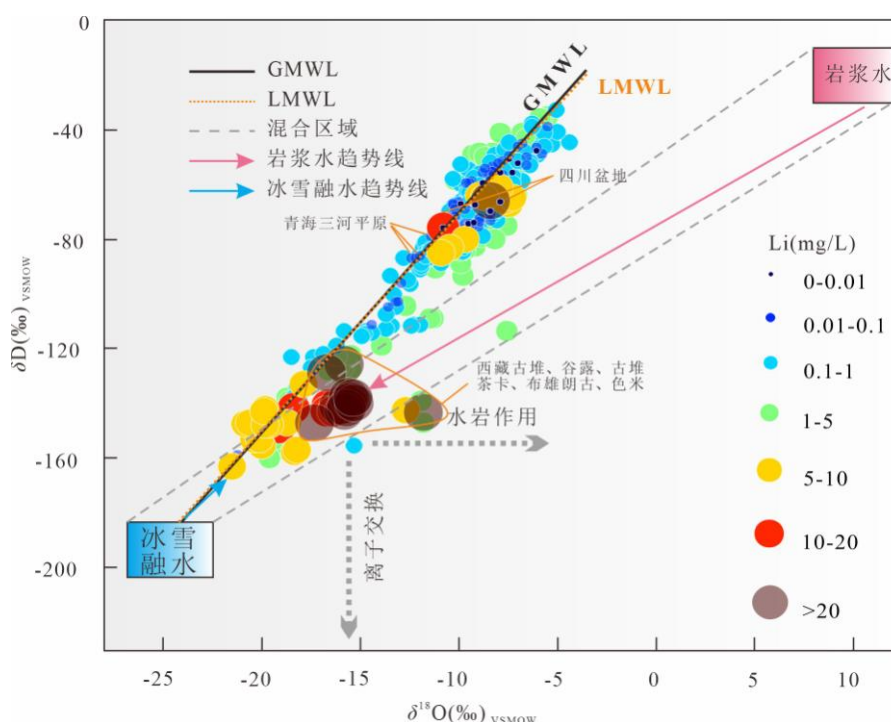


图 10 地热水中 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图解（冰雪融水区域引自 Guo et al., 2010；岩浆水引自 Giggenbach, 1992；地热水氧同位素数据中安徽引自隋丽媛等, 2022；北京引自邓俊祖, 2022；广东引自天骄等, 2022；广西引自杨妍妍等, 2006；贵州引自陈正山, 2021；海南引自张颖, 2019；河北引自张雪, 2012；张良, 2022；邓俊祖, 2022；黑龙江引自李一鸣, 2019；湖北引自陈刚等, 2013；余杰等, 2022；吉林引自蔡壮, 2020；江西引自崔玉贵, 2021；内蒙古引自石卓, 2010；顾晓敏, 2017；青海引自刘明亮, 2015；李乐乐, 2016；李永革, 2016；山东引自王昕昀, 2018；山西引自张森琦等, 2007；马瑞, 2007；刘畅, 2019；张梦昭, 2022；四川引自李娜, 2020；王花, 2020；徐艳秋, 2021；天津引自刘畅等, 2019；云南引自刘明亮, 2015；李晓露, 2017；刘宇, 2020；张彧齐, 2020；重庆引自苏丕辉, 2020；西藏引自刘昭, 2014；刘明亮, 2015；王思琪, 2017；李明礼, 2018；马鑫, 2021。

Fig.10 Diagram of $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ in geothermal water in China (the rectangle of magmatic water area was plotted according to Giggenbach, 1992; the rectangle of snow-melt water area was plotted according to Guo et al., 2010; Anhui after Sui et al., 2022; Beijing after Deng, 2022; Guangdong after Tian et al., 2022; Guangxi after Yang et al., 2006; Guizhou after Chen, 2021; Hainan after Zhang, 2019; Hebei after Zhang, 2012; Zhang, 2022; Deng, 2022; Heilongjiang after Li, 2019; Hubei after Chen et al., 2013; Yu et al., 2022; Jilin after Cai, 2020; Jiangxi after Cui, 2021; Inner Mongolia after Shi, 2010; Gu, 2017; Qinghai after Liu, 2015; Li, 2016; Li, 2016; Shandong after Wang, 2018; Shanxi after Zhang et al., 2007; Ma, 2007; Lu, 2019; Zhang, 2022; Sichuan after Li, 2020; Wang,

2020; Xu, 2021; Tianjin after Lu, 2019; Yunnan after Liu, 2015; Li, 2017; Liu, 2020; Zhang, 2020; Chongqing after Su, 2020; Tibet after Liu, 2014; Liu, 2015; Wang, 2017; Li, 2018; Ma, 2021)

4.5 大陆地热流体锂同位素组成特征及示踪指示作用

锂同位素作为非传统稳定同位素家族成员，因其在不同地质储库分馏显著，近年来已经成为同位素地球化学热门领域和前沿之一 (Tomascak et al., 2016; He Maoyong et al., 2020)。Li 示踪优势在于：(1) Li 是自然界最轻的碱金属元素，有两个稳定同位素 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ ，丰度分别为 7.6% 和 92.4%，其相对质量差可达 16.7%，因此在地质过程很容易表现出强烈的同位素分馏 (达 70‰) (汤艳杰等, 2009; Penniston-Dorland et al., 2017)。(2) 在壳幔分异和结晶分异过程中，Li 是中等不相容元素 (Tomascak et al., 2016)。(3) Li 具有流体活动性， ${}^7\text{Li}$ 优先在液体相富集 (Penniston-Dorland et al., 2017)。Li 具有较快的扩散速率，在矿物或熔体中 ${}^6\text{Li}$ 扩散更快 (Coogan et al., 2005)，所以 Li 同位素在流体活动参与活动中，比如地表风化、洋壳蚀变及俯冲带脱水中有强烈的分馏 (Brenan et al., 1998; Caciagli et al., 2011; Liu Haiyang et al., 2019)。(4) 由于 Li 无化合价变化和参与生命过程，氧化还原作用和生物作用对其分馏可能没有影响 (Clergue et al., 2015)。因此，锂同位素成为了一个极具潜力的示踪工具。

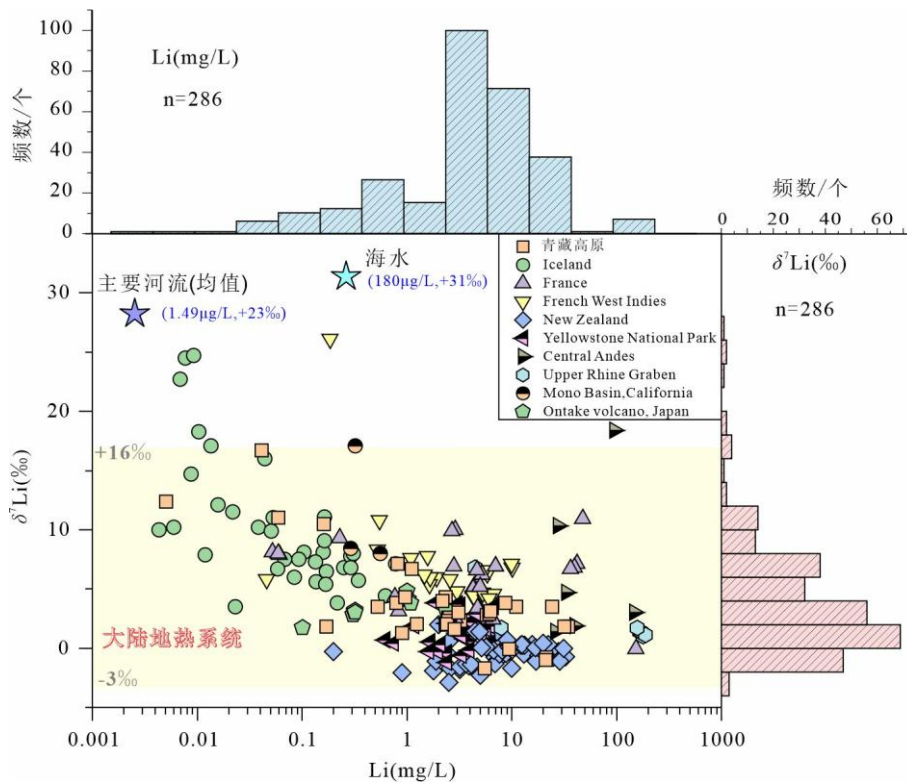


图 11 大陆地热流体锂同位素与锂含量分布特征(青藏高原数据引自肖应凯等, 1994; Ma et al., 2020; He et al., 2020; 张煜道等, 2022; 于泓等, 2022; Zhang et al., 2022; Iceland 数据引自 Sunjuan et al., 2014; France 数据引自 Millot et al., 2007a, 2007b, 2011; Frence West Indies 数据引自 Millot et al., 2010; New Zealand 数据引自 Millot et al., 2012; Bernal et al., 2014; Yellowstone National Park 数据引自 Cullen, 2020; Central Andes 引自 Godfrey et al., 2013; Upper Rhine Graben 数据引自 Sunjuan et al., 2016; Mono Basin, California 数据引自 Tomascak et al., 2003; Ontake volcano, Japan 数据引自 Nishio et al., 2010; 海水数据引自 Misra et al., 2012; 世界主要大河数据引自 Huh et al., 1998)

Figure.11 Distribution characteristics of lithium isotope and lithium content in continental geothermal fluids (Tibetan Plateau after Xiao et al., 1994; Ma et al., 2020; He et al., 2020; Zhang et al., 2022; Yu et al., 2022; Zhang et al., 2022; Iceland after Sunjuan et al., 2014; France after Millot et al., 2007a, 2007b, 2011; France West Indies after Millot et al., 2010; New Zealand after Millot et al., 2012; Bernal et al., 2014; Yellowstone National Park after Cullen, 2020; Central Andes after Godfrey et al., 2013; Upper Rhine Graben after Sunjuan et al., 2016; Mono Basin, California after Tomascak et al., 2003; Ontake volcano, Japan after Nishio et al., 2010; sea after Misra et al., 2012; main major rivers in the world after Huh et al., 1998)

基于全球各地大陆地热系统锂同位素数据分析，发现大陆地热水锂含量在 0.0005-190mg/L（均值为 10.28 ± 26.78 mg/L， $n=286$ ）之间变化，超过海水（180 μ g/L）和世界主要河流（1.49 μ g/L）（Huh et al., 1998; Misra et al., 2012）。相比较海底热液相对均匀的锂同位素组成（锂同位素均值 $+8 \pm 4\%$ ，Verney-Carron et al., 2015），大陆地热水锂同位素值变化很大（-2.9‰到+26.1‰，均值为 $3.84 \pm 4.67\%$ ， $n=286$ ），锂同位素平均值低于海水、世界主要河流（+31‰，+23‰）（Huh et al., 1998; Misra et al., 2012）。

广义上根据地热系统提供热量来源，将地热水划分为岩浆热源型和非岩浆热源型两类（郭清海, 2022）。一些典型的岩浆和非岩浆热源型地热系统的锂含量及锂同位素组成如表 1。岩浆热源型地热系统中如西藏羊八井、搭格架、谷露、冰岛 Krafla 地热田、美国黄石国家公园以及新西兰陶波火山岩区，这些地热系统热储温泉较高，一般高于 200℃，锂含量范围介于 0.023-34.4mg/L， $\delta^7\text{Li}$ 介于-2.9~8.1‰。而非岩浆热源型地热系统如四川茶洛、龙头沟、云南天生桥、青海大柴达木热泉及美国 Mono Basin，这些地热系统热储温泉一般低于 200℃，锂含量范围介于 0.0005-190mg/L， $\delta^7\text{Li}$ 介于-0.1~26.1‰。比较发现，岩浆热源型地热系统地热水一般具有较高锂含量，锂同位素较低且均一（余小灿等,2020）；而非岩浆热源型地热系统地热水锂含量变化范围大，部分地热水中锂含量远大于岩浆热源型地热系统，锂同位素较高且表现不均一。由此看出，不同类型地热系统锂含量及锂同位素不仅取决于热储温泉，还取决于其他因素，如储层岩石性质、流体类型或蚀变程度（Sanjuan et al., 2014）。

表 2 大陆地热系统锂含量及锂同位素组成

Table.2 Lithium content and isotope composition in continental geothermal system

地热系统类型	来源	Li(mg/L)	$\delta^7\text{Li}/\%$	参考文献
岩浆热源型	西藏羊八井、卡乌、色米、搭格架、谷露、曲才地热田	5.5~34.4	-1.7~3.8	张煜道等, 2022; Zhang et al., 2022
	冰岛 Krafla 地热田	0.023~0.78	3.5~8.1	Sunjuan et al., 2014
	美国黄石国家公园	0.626~6.76	-1.2~3.8	Cullen, 2020
	新西兰陶波火山岩区	0.2~32.5	-2.9~2	Millot et al., 2012; Bernal et al., 2014
非岩浆热源型	四川茶洛、龙头沟、毛垭、热水塘、海螺沟、二道桥、贡嘎神汤	0.0005~3.10	1.26~16.7	Ma et al., 2020; 于枫等, 2022
	云南天生桥、红莫、鸭子庄温泉	0.058~1.10	3.8~11	Ma et al., 2020
	青海大柴达木热泉	2.34~3.25	2.29~4.33	肖应凯等, 1994; He et al., 2020
	欧洲 Upper Rhine Graben	4.5~190	1~6.8	Sunjuan et al., 2016
	南美 Central Andes	26.2~147.4	1.4~18.4	Godfrey et al., 2013
	法国 Limagne Basin、Paris Basin	0.0052~153	-0.1~10.9	Millot et al., 2007a, 2007b, 2014;

法属 West Indies 岛	0.0005~10.1	3.8~26.1	Millot et al., 2010
美国 Mono Basin	0.292~0.56	8~17.1	Tomascak et al., 2003

锂同位素在大陆地热系统中已被广泛应用于估算热储温泉 (Millot et al., 2010; Sanjuan et al., 2014, 2016)、示踪地热流体及流体物质来源 (Sanjuan et al., 2016; 张煜道等, 2022)、反映流体与围岩之间的水岩相互作用以及地热流体演化过程 (Millot et al., 2007b, 2010, 2011; Godfery et al., 2013) 等。其中, 在示踪流体或物质来源方面, 地热流体中的锂可来自深部流体、海水、地下水或大气降水等, 根据不同流体混合可以解释地热流体锂同位素值。不过, 锂同位素还受储层岩石类型、热储温度、与围岩之间的水岩作用程度影响。Millot et al. (2007b) 在对法国地热系统调查时发现储层岩石类型能影响 Li 同位素特征。之后, Millot et al. (2010) 在对马提尼克岛和瓜德罗普岛地热系统调查时, 发现锂同位素变化范围为 4‰~26‰, 虽然从深部储层收集的地热流体的 Li 同位素特征在特定地点是均匀的, 但这些储层的锂同位素特征却有显著差异, 这单凭海水加入所致不能解释, 结合海水/玄武岩模拟实验, 推测这可能是水岩相互作用过程中温度差异造成的。Millot et al. (2012) 认为温度可能不是影响地热流体中 Li 同位素组成的主要因素。相反, 他们将陶波火山区地热流体中观察到的均一和 $\delta^7\text{Li}$ 值归因于同一源岩中淋滤所致。Bernal et al. (2014) 也证明 Li 同位素受水-岩相互作用影响较大, 陶波火山区地热流体中低 $\delta^7\text{Li}$ 表明流体与源岩之间发生了相互作用, 并且流体的低 $\delta^7\text{Li}$ 从低 $\delta^7\text{Li}$ 的源岩中淋滤出来的。张煜道等 (2022) 对西藏羊八井-当雄断裂带地热水研究发现, 研究区地热水异常富集 B、Li、Rb、Cs 等元素, 其 $\delta^7\text{Li}$ 范围 (3.5‰~3.8‰) 处于岛弧重熔岩浆 $\delta^7\text{Li}$ 值范围 (2‰~6‰) 内, 推测地热水中 B、Li 等稀有碱金属元素的异常富集主要受地壳重熔型残余岩浆流体上涌影响。于飒等 (2022) 在对四川茶洛热泉研究中, 根据锂同位素质量平衡估算出岩石锂同位素值为 $1.14 \pm 2.06\%$, 接近川西锂矿成矿母岩锂同位素组成, 认为茶洛热泉水中的锂元素来源于深部花岗岩岩体。综上, 利用锂同位素技术示踪地热水来源、水岩相互作用及物质来源方面具有良好的潜力。

4.6 大陆地热流体锂富集机制

根据富锂地热水分布特征和富集规律, 锂富集机制可分为喜马拉雅地热型和四川盆地型。

喜马拉雅地热带型锂富集机制如图 12 所示: 印度板块与欧亚板块持续性碰撞所形成的构造变形, 形成了下地壳深融型岩浆源区和中部局部低速熔融层, 而且在上地壳的一定深度内发育重熔岩浆和不同深部局部带状熔融体, 这构成了喜马拉雅地热带独有的壳幔热结构及构造热演化机制, 为地热水提供了热源 (多吉, 2003; 王贵玲等, 2020a)。同时前人对搭格架、羊八井硅华的 S 同位素研究发现其值接近地幔, 暗示了深部重熔岩浆的贡献 (李振清, 2005), 地热水中的富集 B 元素和 B 同位素也证实残余岩浆流体或熔融体中的组分可能通过岩浆脱气作用进入地热水 (Zhang et al., 2015), 另外, 富锂地热水周边还分布有喜山期电气石花岗岩, 反映浅部岩浆房具有富稀有金属元素特征, 为地热水提供了物源。大气降水和冰雪融水是补给源, 冷水沿断裂下渗过程中温度逐渐升高, 经局部熔融体提供流体物质

2021)。

5 开发利用前景及地热水提锂技术

地热卤水的锂资源量虽然仅占全球总量的 2% (Christmann et al., 2015), 但是它仍然是锂资源一个新的来源且具有绿色、低碳意义。地热发电站提供了一个方便的机会, 可以将锂回收装置集成到已经提供热卤水的设施中, 利用既有基础设施, 可节约地热卤水开采成本 (Jeffers et al., 2017)。即使是锂浓度较低的热卤水, 例如 10mg/L, 通过 50MW 规模的工厂的流量可以每天从地球内部带出几百公斤的金属锂 (Bloomquist, 2006)。此外, 产品可以更快地交付市场, 因为锂能更快地从卤水中提取——与太阳能蒸发过程所需的几个月和几年相比, 只需几个小时或几天 (Jeffers et al., 2017)。当前, 各种技术已用于地热水提取, Stringfellow et al. (2021) 全面地、系统地提出了地热水提锂技术分类, 即浓缩-沉淀、有机吸附剂、无机分子筛阳离子交换吸附剂、溶剂萃取、膜分离和电化学分离技术。其中:

① 浓缩-沉淀: 锂能以金属硫化物或氢氧化物的形式直接从地热水中沉淀。然而, 这种工艺只适用于(i)金属浓度低和(ii)金属种类不多的情况。此外, 沉淀可能不适用于地热水直接提取锂, 通过沉淀提取的锂也需要提纯处理, 以满足锂电池生产或其他用途 (Ighalo et al., 2022)。② 有机吸附剂: 其中有机离子交换树脂对锂离子的选择性和亲和力低, 而不适用于锂的提取和回收 (Stringfellow et al., 2021)。而锂印迹聚合物具有金属选择性, 使用锂印迹聚合树脂与分子筛纳米颗粒组成纳米复合吸附剂, 可从地热卤水中有选择性回收锂 (Stringfellow et al., 2021)。③ 无机分子筛阳离子交换吸附剂: 无机结晶固体中氢氧化铝 (AlOH)、氧化铝 (AlOx)、氧化锰 (MnOx) 和氧化钛 (TiOx), 已被证明具有选择性 (Li et al., 2018), 另外, AlOH 和其他化学物质添加到沸石中可以用于锂吸附剂 (Wiśniewska et al., 2018)。然而, 吸附剂在重复吸附-萃取循环中的稳定性可能会影响其实际应用 (Jiang et al., 2019)。④ 溶剂萃取: 溶剂萃取是从水溶液中分离金属的一种成熟的技术。溶剂萃取从水溶液中提取金属, 由于设备和操作简单, 较为经济的; 然而, 化学品的成本可能很大 (Spasic et al., 2020)。⑤ 膜分离技术: 在直接萃取锂的背景下, 膜分离的研究包括对允许锂优先通过的膜的特别选择性的研究; 选择性较低的纳米滤膜, 允许较小的单价离子(包括锂)渗透, 但拒绝较大的二价离子; 以及去除水以浓缩所有盐(包括锂)的膜工艺 (Somrani et al., 2013; Razmjou et al., 2019)。决定离子通道对锂的选择性的主要因素包括纳米通道相对于水合和裸锂离子半径的大小、通道的表面电荷以及通道的形态 (Razmjou et al., 2019)。锂选择性膜仍在基础研究中, 多为实验室规模的测试, 尚未提出用于从地热卤水中提取锂。⑥ 电化学分离: 电渗析是一种膜分离过程, 它使用电场来帮助离子穿过半透膜。用于锂提取的电渗析取决于锂选择膜的使用, 然而, 离子膜的耐久性差是阻碍电渗析成为广泛应用的锂回收技术的主要问题。

上述技术中, 通过金属氧化物和氢氧化物吸附是最成熟、最先进从卤水提锂方法。目前, 正在进行的索尔顿海地热卤水提取锂都是基于使用无机分子筛阳离子交换吸附剂吸附锂 (Stringfellow et al., 2021)。EnergySource 在索尔顿海地热田进行了一个名为“ATLiS”的

项目，计划每年生产 16500 吨碳酸锂（LCE），并且还专门针对索尔顿海 KGRA 地热卤水提出了“集成锂吸附解吸（ILiAD）”锂提取工艺和生产步骤（图 13）（Stringfellow et al, 2021），该工艺流程包括预处理、氧化锂萃取和连续锂离子交换回收，然后进行纯化并将其转化为可销售的产品（碳酸锂或氢氧化锂）。最近从《地热加》获得信息，万锂新能源公司与西藏羊易电站将利用吸附法提取锂。未来我国地热水提取锂前景良好，不过我国富锂地热水多集中在青藏高原，生态环境脆弱，后续开发需充分考虑和利用当地环境条件和地热能及太阳能等绿色资源优势，在提高提锂水平的前提下，也要尽可能减少化学试剂的添加。

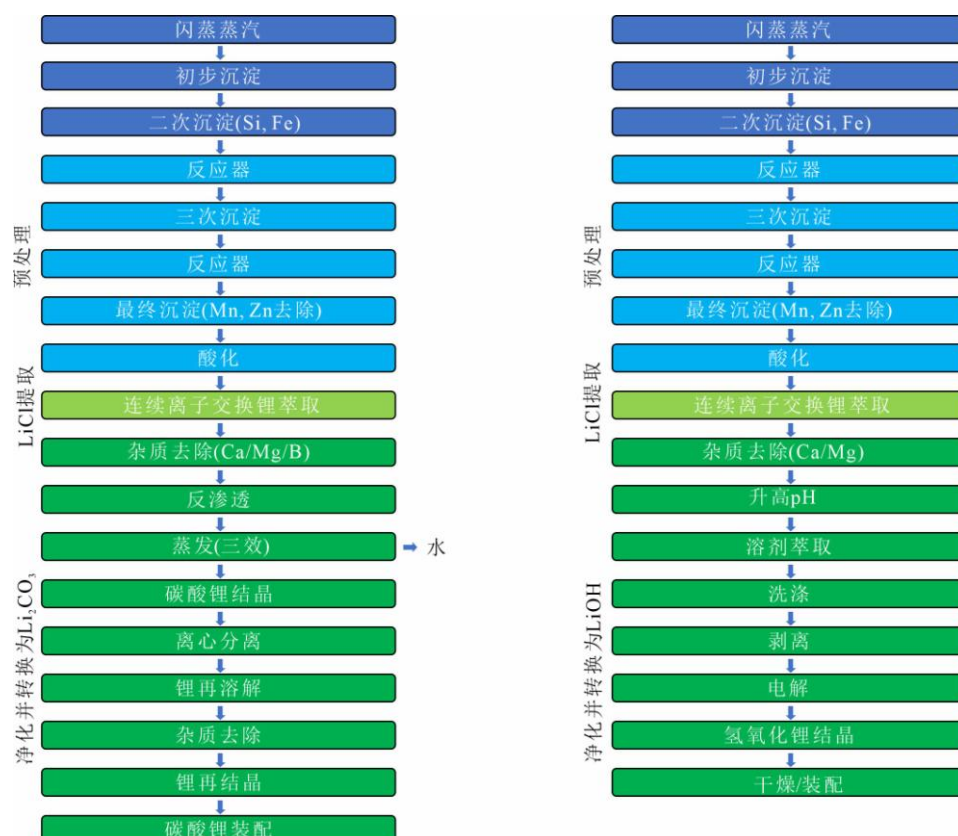


图 13 EnergySource 公司从地热卤水中提取锂和其他有价值材料的专利工艺流程（Stringfellow et al, 2021）

Figure.13 EnergySource patented process for extraction of lithium and other valuable materials from geothermal brine（Stringfellow et al, 2021）

6 找矿方向及勘查技术方法

6.1 找矿方向

实现“热锂兼探”“热锂兼采”，以往地热勘查过程中仅评价地热水是否达到理疗热矿水水质标准，未重视地热水中锂等稀有金属元素是否可以开发利用。一旦地热提锂的工艺突破，地热水中锂资源可以综合利用，必将促使地热产业转型升级。近年来，中央及地方政府都加大了地热资源勘查经费投入，如山东省近些年来新施工了 400 多眼地热井，提交地热田 40 余处（王贵玲, 2020）。全国地热勘查工作逐渐“升温”，新施工的地热井需要开展地热地质调查和水化学测试工作。此外，青藏高原地热调查间隔时间近 40 多年，在调查中地热水包括锂在内的水化学参数、流量是否发生变化，如何变化，这也是未来制约地热

水提锂产业发展的关键问题。

目前来看,富锂的地热水集中分布于青藏高原及四川盆地。青藏高原地质工作程度较低,如西藏,尚有许多地热水点未开展过调查,本次进行计算的部分西藏地热水中金属锂年排放量将近 600t,地热水锂资源找矿前景看好,但究竟有多少资源潜力还需进一步调查和精细化评价。基于本次工作,今后重点在西藏羊八井、色米、拉多岗、谷露、古堆、云南腾冲、川西高温等地热田开展地热地质调查和地热水(井)动态监测和锂资源评价工作,查明地热田构造和地质特征,研究地热水锂富集机制,估算地热田浅部和深部热储地热资源量、发电潜力,评价锂资源潜力;利用地球化学测量、大地电磁测深和遥感等多种手段测量,探测深部热储展布,达到立体探测目的,为钻探验证提供科学依据。

在四川盆地(如遂宁大英、自贡、黄金口等)深部卤水中寻找地热卤水锂矿,开展勘查钻探工程,全方面分析测试深部热卤水及热储围岩样品,查明四川盆地富锂地热卤水分布和展布特征,研究地热卤水中锂的来源、迁移、富集机制,建立地热卤水锂富集规律,查明锂资源潜力,圈定远景区,预测资源量,估算资源储量,创新成矿理论(王登红等,2018),为国家提供系统地热卤水锂矿找矿探测技术示范,为我国西部柴达木盆地、塔里木盆地、我国东部的江汉盆地、吉泰盆地、南阳盆地等其他深部卤水型锂矿探测提供技术示范和参考(王登红等,2018)。此外,还需要充分考虑和利用深部卤水的地热资源优势,避免资源浪费,须重视地热水含锂在内的水化学动态监测、流量监测,为后续开发利用提供可靠性保障。

此外,我国油(气)田区蕴藏着大量的地热资源的同时,油(气)田水还富含锂等金属元素,如柴达木西部南翼山油田水中 Li 含量超过 200mg/L,塔里木盆地气田水样品 Li 含量可高达 94.1mg/L,川东北黄金口背斜群气井水 Li 含量最高达 323mg/L,威远气田水 Li 含量达 97.5mg/L,江汉凹陷中砂市组及新沟嘴油田水 Li 含量范围为 52~65mg/L(高娟琴等,2022)。如果可以利用这些油(气)田既有设施,既能节约钻探投资,规避地质风险,也能实现油田区“热锂兼采”低成本、可持续、综合开发利用,推动油田企业的绿色能源产业发展(王贵玲等,2022)。对于已经报废、停产、废井等“无用井”,也可以通过改造为地热井,进行“热锂兼采”,实现资源最大化的利用。

6.2 勘查技术方法

地热勘查技术方法主要包括前期资料收集与整理、地热地质调查、地温测量与岩石热物性测试、遥感、地球物理勘探、地球化学勘探、元素地球化学、同位素地球化学测试及监测。其中,地热地质调查是基础。上世纪七十年代,中科院、北京大学等单位组织的青藏高原综合科学考察队先后对西藏、横断山区的温泉进行了实地调查,为青藏高原地区地热资源研究提供了基础资料。2011年,中国地质调查局启动了全国地下水资源现状调查评价工作,对各省现有温泉、地热井的地热地质背景、流体物理化学性质、动态变化及开发利用现状进行了调查,这形成了全国范围的第一手资料。本次研究也是建立在上述工作基础上。

地温测量中,米温测量由于探测深度有限,仅能反映地表热异常,代表的是热流体排泄区或热流体浅部运移通道附近的热异常,通常会与真正的热中心发生偏离;百米测温可以增

强地热田在不同深度温度场的变化, 圈定真正的热中心, 确定深部热异常形态, 判断热流体的运移方向和来源, 如在谷露地热田实施百米测温判断出热流体在南北、东西方向的运移趋势, 为下一步勘查方向提供了部署依据(张松等, 2022)。

地球物理勘探包括天然场音频大地电磁测深 (AMT)、大地电磁测深 (MT)、可控源音频大地电磁测深 (CSAMT) 等, 这几种采集方法、解译原理基本相同, 主要是频率范围和探测深部有所差异。最近, 郑伟等 (2021) 利用 MATLAB 脚本语言将 AMT 和 MT 数据进行同点位拼接, 可覆盖 AMT 和 MT 整个频段, 发挥二者优点, 既能兼顾浅部和深部信息的反演, 也能提高横向、纵向分辨率, 获得可靠深部电性结构。球物理勘查逐渐转向高精度、3D 化、量化, 如利用 3D 地震解译地热区地质结构、利用 MT 和 TEM 方法精细刻画三维热结构、利用组合地球物理方法建立三维可视化模型和评价地热资源勘查、利用重磁数据水平进行梯度分析、利用高精度航测研究地质结构与高温地热系统的关系等(王贵玲等, 2020b; 李祎昕, 2022)。

化探中常用的方法是土壤化探和土壤氦气测量。前者用于圈定热田范围和推断热田构造, 常用汞砷锑铋四种元素作为热田勘察的地球化学指标。如在谷露地热田开展土壤化探, 验证了土壤地球化学指标对覆盖层下的热储有指示作用, 圈定了深部热储层范围(宋亮等, 2022)。土壤氦气测量中氦异常宽度、峰背比和平均异常衬度能很好反映地热田断裂构造活动性(吴儒杰等, 2022)。

地球化学勘查是地热地质调查中的有效方法之一, 是通过分析天然温泉或地热井的水化学成分、环境同位素、非传统同位素、气体组分等来判断地热系统的热源、金属元素来源、地下热水补给来源、径流过程、混合作用、循环深度、滞留时间和推算热储温度等, 为建立热储概念模型提供依据。

此外, 我国地热资源开发利用过程中水位、水温、水化学及流量等监测数据对开发利用的科学性、可持续性具有重要意义, 而目前仅北京、天津、河北开展过相对监测工作外, 其余省份基本无监测数据, 监测设备落后(王贵玲等, 2020b)。所以今后在地热资源开发利用工程中需要通过动态监测, 建立科学的监测体系, 进行数值模拟, 科学规划开发利用方案。

7 结论

(1) 我国地热水中锂含量呈良好的正态分布, 富锂地热水集中分布在喜马拉雅地热带和四川盆地, 与喜马拉雅成锂带、冈底斯成锂带及四川盆地成锂带相对应。

(2) 根据各省市地热地质条件, 分析了 30 个省市主要热储中地热水锂含量。通过 1989 处温泉和地热井数据实际计算出地热水锂金属年排放量为 789t, 估算我国地热水锂金属年排放量 3233t。

(3) 影响地热水锂含量的因素主要有围岩或热储岩石性质、温度、水岩作用等。其中我国锂地球化学背景与地热水锂含量之间存在一定对应关系, 尤其是 Li06、Li08 异常区, 反映地热水中锂的富集与基岩有关; 地热水的温度与锂含量之间存在正相关, 可能是通过加强水岩作用强度, 促进 Li 元素的溶滤来实现; 通过氢氧同位素与锂含量关系也揭示了氧同

位素正漂移即较强的水岩作用会导致地热水 Li 的富集。

(4) 大陆地热系统地热水锂含量及锂同位素分别为 $10.28 \pm 26.78 \text{mg/L}$ 、 $3.84 \pm 4.67\%$ 。锂同位素在示踪地热水来源、水岩相互作用及物质来源方面具有良好的潜力，尤其是在青藏高原利用锂同位素可以解释地热水锂的来源。

(5) 我国地热水锂富集机制主要分为喜马拉雅地热带型和四川盆地型。前者在印度板块与欧亚板块碰撞背景下受上地壳重熔岩浆上涌及岩浆脱气影响；后者受含水层、含盐背斜及断裂构造影响，另外峨眉山幔柱大规模活动之后的岩浆事件可能为地热水提供了物质来源。

(6) 开发地热水前景良好，目前地热水提锂技术主要有浓缩-沉淀、有机吸附剂、无机分子筛阳离子交换吸附剂、溶剂萃取、膜分离和电化学分离技术等 6 类。未来，我国富锂地热水找矿方向集中在青藏高原、四川盆地、江汉盆地等及油（气）田水伴生 Li 资源，进行“热锂兼探”、“热锂兼采”，以实现资源最大化利用。多元化勘查技术的开展将促进地热产业的发展。

References

- Alessia A, Alessandro B, Maria V, Carlos V, Francesca B. 2021. Challenges for sustainable lithium supply: A critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 300(1):126954.
- Arnórsson S, Andrédóttir A. 1995. Processes controlling the distribution of boron and chlorine in natural waters in Iceland[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(20):4125-4146.
- Bernal N F, Gleeson S A, Dean A S, Liu Xiaoming, Hoskin P. 2014. The source of halogens in geothermal fluids from the Taupo Volcanic Zone, North Island, New Zealand[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 126(2):265-283.
- Bloomquist G R. 2006. Economic Benefits of Mineral Extraction from Geothermal Brines[M]. *Geothermal Resources Council Transactions*2006, 30:579-582.
- Brenan J M, Ryerson F J, Shaw H F. 1998. The role of aqueous fluids in the slab-to-mantle transfer of boron, beryllium, and lithium during subduction: Experiments and models[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(19):3337-3347.
- Caciagli N, Brenan J M, McDonough W F, Phinney D. 2011. Mineral-fluid partitioning of lithium and implications for slab-mantle interaction[J]. *Chemical Geology*, 280(3-4):384-398.
- Chai Rui. 2006. A study of hydrochemistry and tufa in thermal groundwater in the Zhouliangzhuang geothermal field, Tianjin[D]. *China University of Geosciences*, 1-72(in Chinese with English abstract).
- Chen Gang, Wan Junwei, Guo Peng, Liu Hong. 2013. Analysis for the Formation Cause of Dongnaoke Hot Spring in Zhonglu Township, Lichuan, Hubei Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(4):196-200(in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang. 1992. Advances of Studies of Geothermal Resources in China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 7(3):9-14(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Xue Lizhi, Wang Xiaolei, Zhao Zhongbao, Han Jinsheng, Zhou Kefa. 2021. Progress in geological study of pegmatite-type lithium deposits in the world[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10):2971-2995(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengshan. 2021. The formation mechanism of physiotherapy thermomineral water (hot spring) in guizhou

- and its effect on human health[D]. Guizhou University, 1-213(in Chinese with English abstract).
- Christmann P, Gloaguen E, Jean-Francois Labbé Piantone P. 2015. Global Lithium Resources and Sustainability Issues[M]. *Lithium Process Chemistry*, 1-40.
- Clergue C, Dellinger M, Buss H L, Benedetti M F, Dessert C. 2015. Influence of atmospheric deposits and secondary minerals on Li isotopes budget in a highly weathered catchment, Guadeloupe (Lesser Antilles) [J]. *Chemical Geology*, 414:28-41.
- Coogan L A, Kasemann S A, Chakraborty S. 2005. Rates of hydrothermal cooling of new oceanic upper crust derived from lithium-geospeedometry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2):415-424.
- Cui Yugui. 2021. Geological Characteristics and Formation Mechanism of Geothermal Resources in Huanglin Area, Yudu, Jiangxi[D]. China University of Geosciences, 1-76(in Chinese with English abstract).
- Cullen J T. 2020. Chemistry-Isotopes-Yellowstone. Texas Data Repository. Retrieved from <https://doi.org/10.18738/T8/ULLRE3>.
- Deng Junzu. 2022. Chemical characteristics and genetic analysis of geothermal water in carbonate reservoir in the northern Jizhong Depression[D]. East China University of Technology, 1-61(in Chinese with English abstract).
- Duo Ji. 2003. The Basic Characteristics of the Yangbajing Geothermal Field-A Typical High Temperature Geothermal System[J]. *Engineering Science*, 5(1):42-47(in Chinese with English abstract).
- Giggenbach W F. 1992. Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 113:495-510.
- Godfrey L V, Chan L H, Alonso R N, Lowenstein T K, McDonough W F, Houston J, Li J, Bobst A, Jordan T E. 2013. The role of climate in the accumulation of lithium-rich brine in the Central Andes[J]. *Applied Geochemistry*, 38:92-102.
- Gu Xiaomin. 2017. Geochemical characteristics and evolution mechanism of thermal and mineral springs in Arxan, north eastern China[D]. China University of Geosciences, 1-132(in Chinese with English abstract).
- Guo Qinghai, Liu Mingliang, Li Jiexiang, Zhang Xiaobo, Guo Wei, Wang Yanxin. 2017. Fluid geochemical constraints on the heat source and reservoir temperature of the Banglazhang hydrothermal system, Yunnan-Tibet Geothermal Province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 172:109-119.
- Guo Qinghai, Wang Yanxin, Liu W. 2010. O, H, and Sr isotope evidences of mixing processes in two geothermal fluid reservoirs at Yangbajing, Tibet, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 59(7):1589-1597.
- Guo Qinghai. 2022. Definition of magma-impacted geothermal system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(1):208-214(in Chinese with English abstract).
- Guo Weiming, Ma Shengchao, Sun Yan, Zhao Zhi, Zhong Hairen, Yao Leishan. 2019. Characteristics and significance of rare metal mineralization in hot-springs of Tengchong area, Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1321-1330(in Chinese with English abstract).
- He Maoyong, Luo Chongguang, Yang Hongjun, Kong Fancui, Li Yulong, Deng Li, Zhang Xiyang, Yang Kaiyuan. 2020. Sources and a proposal for comprehensive exploitation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin on the northern Tibetan Plateau, China: Evidence from Li isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 117:103277.
- Huh Y, Chan L, Zhang Libo, Edmond J M. 1998. Lithium and its isotopes in major world rivers: Implications for weathering and the oceanic budget[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62:2039-2051.
- Ighalo J O, Amaku J F, Olisah C, Adeola A O, Iwuzor K O, Akpomie K G, Conradie J, Adegoke K A, Oyedotun K O. 2022. Utilisation of adsorption as a resource recovery technique for lithium in geothermal water[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 365:120107.
- Jeffers K, Renew J, Muto A, McCabe K. 2017. Lithium Extraction from Low Temperature Geothermal Brines with Integrated Thermoelectric Generation[J]. *GRC transactions*, 41:1-16.

- Jiang Huixiong, Yang Ying, Sun Shuying, Yu Jianguo. 2019. Adsorption of lithium ions on lithium-aluminum hydroxides: Equilibrium and kinetics[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98, 544-555.
- Li Boyang, Jiang Dawei, Fu Xu, Wang Lei, Gao Shuqi, Fan Zhiyong, Wang Kexiang, Huge Jiletu. 2018. Geological characteristics and prospecting significance of Weilasituo li polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Exploration*, 9(6):1185-1191(in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. The Metallogenetic Regularity of Lithium Deposit in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12):2269-2282(in Chinese with English abstract).
- Li Ling, Deshmane V G, Paranthaman M P, Bhave R, Moyer B A, Harrison S. 2018. Lithium Recovery from Aqueous Resources and Batteries: A Brief Review. *Johns[J]. Johnson Matthey Technology Review*, 62(2):161-176.
- Li Mingli. 2018. Genesis and Efficacy of the Typical therapy Geothermal Mineral Spring, Tibet[D]. Chengdu University of Technology, 1-135(in Chinese with English abstract).
- Li Na. 2020. A study of the characteristics and genesis of the hot springs and salty springs in the Xichang area of Sichuan[D]. *China University of Geosciences*, 1-81(in Chinese with English abstract).
- Li Yiming. 2019. Characteristics and resource evaluation of geothermal resources in Zhaoxing Town, Luobei County, Heilongjiang Province[D]. *Jilin University*, 1-77(in Chinese with English abstract).
- Li Yixin, Jiang Lili, Wang Chao, Wang Ying, Li Bonan, Zhang Yuan, Zhao Xiaoshu, Zhang Yanlong, Liu Maochuan, Zhang Yong. 2022. Application of 3D Visualization Technology in Geothermal Resources Development in Shenbei Basin[J]. *Geology and Resources*, 31(1):76-80(in Chinese with English abstract).
- Li Zhengqing, Hou Zengqian, Nie Fengjun, Meng Xiangjin. 2005. Characteristic and Distribution of the Partial Melting Layers in the Upper Crust: Evidence from Active Hydrothermal Fluid in the South Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 68-77(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Yu Xiaocan, Yuan Xueying, Li Ruiqin, Yao Fojun, Shen Lijian, Li Qiang, Zhao Yuanyi. 2021. Characteristics, distribution regularity and formation model of brine-type Li deposits in salt lakes in the world[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7):2009-2029(in Chinese with English abstract).
- Liu Gui, Zhao Zhongwei, Ghahreman A. 2019. Novel approaches for lithium extraction from salt-lake brines: A review[J]. *Hydrometallurgy*, 187, 81-100.
- Liu Gui, Zhao Zhongwei, He Lihua. 2020. Highly selective lithium recovery from high Mg/Li ratio brines[J]. *Desalination*, 474(15):114185.
- Liu Haiyang, Sun He, Xiao Yilin, Wang Yangyang, Zeng Linsen, Li Wangye, Guo Haihao, Yu Huimin, Pack A. 2019. Lithium isotope systematics of the Sumdo Eclogite, Tibet: Tracing fluid/rock interaction of subducted low-T altered oceanic crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 246:385-405.
- Liu Jie. 2013. The Geochemical Character of Geothermal Liquid in TianJin Area[D]. *China University of Geosciences*, 1-72(in Chinese with English abstract).
- Liu Mingliang. 2015. A Comparison of Geochemistry in Geothermal System with Different Heat Source -as Gonghe Geothermal Field in Qinhai Province and Rehai Geothermal Field in Yunnan Province for Example[D]. *China University of Geosciences*, 1-73(in Chinese with English abstract).
- Liu Mingliang. 2018. Boron geochemistry of the geothermal waters from typical hydrothermal systems in Tibet[D]. *China University of Geosciences*, 1-94(in Chinese with English abstract).
- Liu Xuheng, Chen Xingyu, He Lihua, Zhao Zhongwei. 2015. Study on extraction of lithium from salt lake brine by membrane electrolysis[J]. *Desalination*, 376(16):35-40.
- Liu Xuheng, Chen Xingyu, Zhao Zhongwei, Liang Xingxing. 2014. Effect of Na⁺ on Li extraction from brine using LiFePO₄/FePO₄ electrodes[J]. *Hydrometallurgy*, 146:24-28.
- Liu Yu. 2020. A study of the hydrochemistry and genesis of hot springs in the Mangshi-Ruili area of Yunnan[D].

- China University of Geosciences, 1-78(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhao. 2014. The forming mechanism of typical high-temperature geothermal systems in Nimu-Naqu geothermal belt, Tibet[D]. Chinese Academy of Geological Science, 1-102(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhu, Deng Zhu, He Gang, Wang Hailin, Zhang Xiang, Lin Jiang, Qi Ye, Liang Xi. 2022. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3:141-155.
- Lu Chang. 2019. Geochemical Characteristics of Fluid and its Genesis in the Capital Area of China[D]. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 1-39(in Chinese with English abstract).
- Ma Shengchao, Wang Denghong, Sun Yan, Li Chao, Zhong Hairen. 2019. Geochronology and Geochemical Characteristics of Lower -Middle Triassic Clay Rock and Their Significances for Prospecting Clay-Type Lithium Deposit[J]. *Earth Science*, 44(2):427-440(in Chinese with English abstract).
- Ma Tingting, Weynell M, Li Siliang, Liu Yongsheng, Chetelat B, Zhong Jun, Xu Sen, Liu Congqiang. 2020. Lithium isotope compositions of the Yangtze River headwaters: Weathering in high-relief catchments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 280:46-65.
- Ma Xin, Fu Lei, Li Tiefeng, Yan Jing, Liu Ting, Wang Mingguo, Shao Wei. 2021. Analysis of Geothermal Origin in Eastern Himalayan Syntaxis[J]. *Geoscience*, 35(1):209~219(in Chinese with English abstract).
- Millot R, Guerrot C, Innocent C, Négrel P, Sanjuan B. 2011. Chemical, multi-isotopic (Li-B-Sr-U-H-O) and thermal characterization of Triassic formation waters from the Paris Basin[J]. *Chemical Geology*, 283(3-4):226-241.
- Millot R, Hegan A, Négrel P. 2012. Geothermal waters from the Taupo Volcanic Zone, New Zealand: Li, B and Sr isotopes characterization[J]. *Applied Geochemistry*, 27(3):677-688.
- Millot R, Négrel P, Petelet-Giraud E. 2007a. Multi-isotopic (Li, B, Sr, Nd) approach for geothermal reservoir characterization in the Limagne Basin (Massif Central, France) [J]. *Applied Geochemistry*, 22(11):2307-2325.
- Millot R, Négrel P. 2007b. Multi-isotopic tracing ($\delta^{7}\text{Li}$, $\delta^{11}\text{B}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and chemical geothermometry: evidence from hydro-geothermal systems in France[J]. *Chemical Geology*, 244(3-4):664-678.
- Millot R, Scaillet B, Sanjuan B. 2010. Lithium isotopes in island arc geothermal systems: Guadeloupe, Martinique (French West Indies) and experimental approach[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 74(6):1852-1871.
- Ministry of Natural Resources, PRC. 2022. China Mineral Resources. Beijing: geological publishing house, 7.
- Misra S, Froelich P N. 2012. Lithium isotope history of Cenozoic seawater: changes in silicate weathering and reverse weathering[J]. *Science*, 335:818-823.
- Nishio Y, Okamura K, Tanimizu M, Ishikawa T, Sano Y. 2010. Lithium and strontium isotopic systematics of waters around Ontake volcano, Japan: Implications for deep-seated fluids and earthquake swarms[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 74(3):567-576.
- Penniston-Dorland S, Liu Xiaoming, Rudnick R L. 2017. Lithium Isotope Geochemistry[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 82(1):165-217.
- Qin Kezhang, Zhao Junxing, He Changtong, Shi Ruizhe. 2021. Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11):3277-3286.
- Razmjou A, Asadnia M, Hosseini E, Korayem A H, Chen V. 2019. Design principles of ion selective nanostructured membranes for the extraction of lithium ions[J]. *Nature communications*, 10:5793.
- Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, China Geological Survey. 2021. Assessment Report for Lithium, Cobalt, Nickel, Tin, and Potash Reserves in the world[J]. *China Geological Survey*, 37-44.
- Sanjuan B, Gourcerol B, Millot R, Rettenmaier D, Jeandel E, Rombaut A. 2022. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources[J]. *Geothermics*, 101,102385.

- Sanjuan B, Millot R, Ásmundsson R, Brach M, Giroud N. 2014. Use of two new Na/Li geothermometric relationships for geothermal fluids in volcanic environments[J]. *Chemical Geology*, 389:60-81.
- Sanjuan B, Millot R, Innocent C, Dezayes C, Scheiber J, Brach M. 2016. Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation[J]. *Chemical Geology*, 428:27-47.
- Shi Zhuo. 2010. Resources Evaluation of Geothermal Field in Reshuizhen of Chifeng City, Inner Mongolia. Jilin University, 1-109(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Xu Zhiqin. 2021. Geological settings and metallogenic conditions of the granite-type lithium ore deposits in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10):3099-3114(in Chinese with English abstract).
- Somrani A, Hamzaoui A, Pontie M. 2013. Study on lithium separation from salt lake brines by nanofiltration (NF) and low pressure reverse osmosis (LPRO) [J]. *Desalination*, 317(15):184-192.
- Song Liang, Sun Guoqiang, Cheng Jixing, Zhu Wanfeng, Wu Guodong, Xu Haizhou, Jiang Zhijun. 2022. Experimental Study on Soil Geochemical Method in the Exploration of High Temperature Geothermal Resources in Gulu Geothermal Field[J]. *World Nuclear Geoscience*, 39(2):330-340(in Chinese with English abstract).
- Spasic A M, Manojlovic V, Jovanovic M. 2020. Solvent extraction and entrainment problem[J]. *Metallurgical and Materials Engineering*, 26(2), 163-175.
- Stringfellow W T, Dobson P F. 2021. Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines[J]. *Energies*, 14(20):6805.
- Su Pihui. 2020. Study on the influence of Chongqing Dongquan Tunnel on Groundwater Environment of Tongjing Thermal Spring[D]. Southwest Jiaotong University, 1-107(in Chinese with English abstract).
- Sun Hongli, Ma Feng, Lin Wenjing, Liu Zhao, Wang Guiling, Nan Dawa. 2015. Geochemical Characteristics and Geothermometer Application in High Temperature Geothermal Field in Tibet[J]. *Geological Science and Technology Information*, 34(3):171-177(in Chinese with English abstract).
- Sun Yan, Gao Yun, Wang Denghong, Dai Hongzhang, Gu Wenshuai, Li Jian, Zhang Lihong. 2017. Zircon U-Pb Dating of 'Mung Bean Rock' in the Tongliang Area, Chongqing and its Geological Significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(6):649-658(in Chinese with English abstract).
- Tabelin C B, Dallas J, Casanova S, Pelech T, Bournival G, Saydam S, Canbulat I. 2021. Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives[J]. *Minerals Engineering*, 163:106743.
- Tang Yanjie, Zhang Hongfu, Ying Jifeng. 2009. Discussion on Fractionation Mechanism of Lithium Isotopes[J]. *Earth Science*, 34(1): 43-55(in Chinese with English abstract).
- Tomascak P B, Hemming N G, Hemming S R. 2003. The lithium isotopic composition of waters of the Mono Basin, California[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 67(4):601-611.
- Tomascak P B, Magna T, Dohmen R. 2016. *Advances in Lithium Isotope Geochemistry*[M]. Springer, Cham, 1-194.
- Tomaszewska B, Szczepański, A. 2014. Possibilities for the efficient utilisation of spent geothermal waters[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(19):11409-11417.
- Tong Wei, Liao Zhijie, Liu Shibin, Zhang Zhifei, Zhang Mingtao. 2000. *Thermal Springs in Tibet*[M]. Beijing: Science Press, 1-259.
- Tong Wei, Zhang Mingtao. 1994. *Thermal springs in Hengduanshan area*[M]. Beijing: Science Press, 1-326(in Chinese with English contents).
- Verney-Carron A, Vigier N, Millot R, Hardarson B S. 2015. Lithium isotopes in hydrothermally altered basalts

- from Hengill (SW Iceland) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 411:62-71.
- Wang Chenghui, Wang Denghong, Chen Chen, Liu Shanbao, Chen Zhenyu, Sun Yan, Zhao Chenhui, Cao Shenghua, Far Xiujun. 2019. Progress of research on the Shiziling rare metals mineralization from Jiuling-type rock and its significance for prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1359-1373(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, Li Jiankang, Wang Chenghui, Lou Debo, Yang Yueqing, Li Peng. 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (5):1-24(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, Wang Chenghui, Yang Yu, Dai Jingjing, Liu Lijun, Yang Yueqing, Ma Shengchao. 2020. Research and exploration progress on lithium deposits in China[J]. *China Geology*, 3, 137-152.
- Wang Denghong, Sun Yan, Liu Xifang, Tian Shihong, Dai Jingjing, Liu Lijun, Ma Shengchao. 2018. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal[J]. *Geological Survey of China*, 5(1):1-9(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Sun Yan, Zhou Sichun, Liang Ting, Fu Yong, Fu Xiaofang, Hao Xuefeng, San Jinzhu, Liu Xifang, Hou Kejun, Guo Weiming, Tian Shihong, Li Chao, Kong Weigang, Ma Shengchao, Guo Xuji. 2021. Progress of the deep exploration technology demonstration project for lithium energy metal mineral base[J]. *Mineral Deposits*, 40(4):641-654 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Peigang, Qu Wenjun, Yin Lijuan, Zhao Zhi, Lei Zhiyuan, Wen Shenfu. 2013. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 56:145-152(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Lin Wenjing. 2020a. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7):1923-1937(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Liu Yanguang, Zhu Xi, Zhang Wei. 2020b. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(1):1-9(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Lu Chuan. 2022. Progress of Geothermal Resources Exploitation and Utilization technology Driven by Carbon Neutralization Target[J]. *Geology and Resources*, 31(3):412-341(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4):449-459(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling. 2020. Develop new geothermal energy and build a clean, low-carbon, safe and efficient energy system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7):1921-1922 (in Chinese).
- Wang He, Huang Liang, Bai Hongyang, Wang Kunyu, Wang Zhenhong, Gao Hao, Zhou Jinsheng, Qin Yan, Wang Yan[J]. 2022. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(5):848-866(in Chinese with English abstract).
- Wang Hua. 2020. Study on the Characteristics and Causes of High Temperature Hydrochemistry in Litang Geothermal Field in Western Sichuan[D]. China University of Petroleum, 1-59(in Chinese with English abstract).
- Wang Siqi. 2017. Hydrogeochemical Processes and Genesis Mechanism of High-temperature Geothermal System in Gudui, Tibet[D]. China University of Geosciences, 1-96(in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Wei Haizhen, Jiang Shaoyong, Tan Hongbing, Eastoe C J, Williams-Jones A E, Hohl S V, Wu Hepin. 2019. The origin of rare alkali metals in geothermal fluids of southern Tibet, China: a silicon isotope perspective[J]. *Scientific Reports*, 9(1): 7918.
- Wang Xinyun. 2018. A study of the characteristics and genesis of the hot springs in the western Shandong Peninsula[D]. China University of Geosciences, 1-83(in Chinese with English abstract).

- Wang Xueqiu, Liu Hanliang, Wang Wei, Zhou Jian, Zhang Bimin, Xu Shanfa. 2020. Geochemical Abundance and Spatial Distribution of Lithium in China: Implications for Potential Prospects[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6):797-806(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhuo, Huang Ranxiao, Wu Datian, Xu Fengming, Sun Weil, Zhang Dehui, Zhao Yuandong. 2022. Basic characteristics and development potential evaluation of brine-type lithium deposits in salt lakes[J]. *Geology in China*, 1-24(in Chinese with English abstract).
- Wen Hanjie, Luo Chongguang, Du Shengjiang, Yu Wenxiu, Gu Hannian, Ling Kunyue, Cui Yi, Li Yang Jihua. 2020. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(1):53-59(in Chinese with English abstract).
- Wiśniewska M, Fijałkowska G, Ostolska I, France W, Nosal-Wiercińska A, Tomaszewska B, Goscińska J, Wójcik G. 2018. Investigations of the possibility of lithium acquisition from geothermal water using natural and synthetic zeolites applying poly (acrylic acid) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 195:821-830.
- Wu Rujie, Sun Guoqiang, Wan Hanping, Xie Yingchun, Zhao Dan, Wang Zongman, Li Ling, Li Bin. 2022. The Application of Soil Radon Measurement Technology in the Exploration of Geothermal Resources in Gulu, Tibet[J]. *World Nuclear Geoscience*, 39(1):89-96(in Chinese with English abstract).
- Xiao Yingkai, Qi Haiping, Wang Yunhui, Jin Lin. 1994. Lithium isotopic compositions of brine, sediments and source water in Da Qaidam lake, Qinghai, China[J]. *Geochimica*, 23(4):329-338(in Chinese with English abstract).
- Xu Bo, Qian Danna, Wang Ziyang, Meng Y S. 2012. Recent progress in cathode materials research for advanced lithium ion batteries[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 73(5-6):51-65.
- Xu Peng, Tan Hongbing, Zhang Yanfei, Zhang Wenjie. 2018. Geochemical characteristics and source mechanism of geothermal water in Tethys Himalaya belt[J]. *Geology in China*, 45(6):1142-1154(in Chinese with English abstract).
- Xu Ping, Hong Jun, Qian Xiaoming, Xu Zhiwei, Xia Hong, Tao Xuchen, Xu Zhenzhen, Ni Qingqing. 2021. Materials for lithium recovery from salt lake brine[J]. *Journal of Materials Science*, 56, 16-63.
- Xu Yanqiu. 2021. A study of the hydrochemical characteristics and geneses of geothermal water in the western edge of the Sichuan Basin in China[J]. *China University of Geosciences*, 1-91(in Chinese with English abstract).
- Yang Yanyan. 2006. A study of the formation and evolution of the Wenluo hot spring and precipitation mechanism for the nearby tufa in Bobai, Guangxi[D]. *China University of Geosciences*, 1-81(in Chinese with English abstract).
- Yao Shuangqiu, Pang Chongjin, Wen Shunv, Liang Hang, Lu Guanghui1, Yin Benchun, Qin Feng, Luo Qiaohua. 2020. Li-rich Claystone in the Upper Permian Heshan Formation in Western Guangxi and its Prospecting Significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(5):951-962(in Chinese with English abstract).
- Yu Feng, Yu Yang, Wang Denghong, Gao Juanqin, Wang Chenghui, Guo Weiming. 2022. Application of Li isotope in geothermal fluid-rock interaction: A case study of modern Li-rich geothermal water in western Sichuan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(2):472-482(in Chinese with English abstract).
- Yu Jie, Mao Xumei, Peng Hui, Wen Meixia, Wang Xin, Fan Wei, Tang Wei. 2022. Mechanism of high salinity geothermal fluid in karst thermal system -A case study in Yanchang river geothermal field[J]. *Carsologica Sinica*, 1-14(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Yu Xiaocan, Yuan Xueying, Li Ruiqin, Yao Fojun, Shen Lijian, Li Qiang, Zhao Yuanyi. 2021. Characteristics, distribution regularity and formation model of brine-type Li deposits in salt lakes in the world[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7):2009~2029(in Chinese with English abstract).
- Yu Xiaocan, Liu Chenglin, Wang Chunlian. 2020. Application of Lithium isotope geochemistry to the study of the

- continental geothermal system[J]. *Advances in Earth Science*, 35(3):246-258(in Chinese with English abstract).
- Zhang Bo, Qi Fanyu, Gao Xuezheng, Li Xiaolei, Shang Yuntao, Kong Zhaoyu, Jia Liqiong, Meng Jie, Guo Hui, Fang Fukang, Liu Yanbin, Jiang Xiao, Chai Hui, Liu Zi, Ye Xiantao, Wang Guodong. 2022. Geological characteristics, metallogenic regularity, and research progress of lithium deposits in China[J]. *China Geology*, 5:734-767.
- Zhang Junwen, Yan Yani, Zhao Zhiqi, Liu Xiaoming, Li Xiaodong, Zhang Dong, Ding Hu, Meng Junlun, Liu Congqiang. 2022. Spatiotemporal variation of Li isotopes in the Yarlung Tsangpo River basin (upper reaches of the Brahmaputra River): Source and process[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 600:117875.
- Zhang Lei, Guo Lishuang, Liu Shuwen, Yang Yao, Shi Deyang. 2021. Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes of hot springs in Xianshuihe-Anninghe fault zone, Sichuan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37 (2):589-598(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liang. 2022. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of middle-deep geothermal reservoirs in Xiong'an New Area[D]. East China University of Technology, 1-55(in Chinese with English abstract).
- Zhang Mengzhao, Guo Qinghai, Liu Mingliang, Liu Qiang. 2022. Geochemical characteristics and formation mechanisms of the geothermal waters in the Xinzhou Basin, Shanxi Province[J]. *Earth Science (in Chinese with English abstract)*.
- Zhang Song, Xie Yingchun, Hao Weilin, Gao Honglei, Sun Guoqiang, Hu Xiancai. 2022. The Characteristics of Temperature Field in Gulu Geothermal Field and its Implications for Further Exploration[J]. *World Nuclear Geoscience*, 39(4):733-745(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. *Geology in China*, 46(2):255-268(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenjie, Tan Hongbing, Zhang Yanfei, Wei Haizhen, Dong Tao. 2015. Boron geochemistry from some typical Tibetan hydrothermal systems: Origin and isotopic fractionation[J]. *Applied Geochemistry*, 63: 436-445..
- Zhang Xue. 2012. A study of the characteristics of hot springs of low to moderate temperature in Chengde district of northern Hebei[D]. China University of Geosciences, 1-71(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanfei, Tan Hongbin, Zhang Wenjie, Huang J Z, Zhang Q. 2015. A new geochemical perspective on hydrochemical evolution of the Tibetan geothermal system[J]. *Geochemistry International*, 53(12):1090-1106.
- Zhang Ying. 2019. A study of the characteristics and formation of the hot springs in Hainan Island[D]. China University of Geosciences, 1-64(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yudao, Tan Hongbing, Cong Peixin, Shi Zhiwei, Yang Junying. 2022. Enrichment Mechanism of B, Li, Rb, and Cs in the Geothermal System of Yangbajin-Dangxiong Rift, Tibet[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuqi. 2020. Hydrogeochemical characteristics and genesis of the springs in the Simao Basin of Yunnan[D]. China University of Geosciences, 1-100(in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Liu Xifang. 2010. Hydrochemistry and Minerals Assemblages of Salt Lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(11):1586-1660(in Chinese with English abstract).
- Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. 1983. Stable isotope composition of precipitation in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 28(13): 801-806(in Chinese with English abstract).
- Zheng Wei, Wang Yangling, Xiao Yang, Gong Xu, Zuo Huancheng, Yang Tao. 2021. Frequency-band merging of AMT and MT data and the application to geothermal resources exploration[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 36(3):388-394(in Chinese with English abstract).

Zhu Mingbo,Wu Zhongru,Wang Sixue, Wang Lixin, Peng Huiqing. 2022. Geological characteristics and genesis of Nanzhou lithium brine deposit in Jitai basin, Jiangxi Province[J]. Resources Environment & Engineering, 36(2):142-148(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴蕊. 2006. 天津市周良庄地热田地下热水的水化学及钙华研究[D]. 中国地质大学(北京), 1-72.
- 陈刚, 万军伟, 郭鹏, 刘洪. 2013. 湖北省利川市忠路镇洞脑壳温泉成因[J]. 地质科技情报, 32(4):196-200.
- 陈墨香. 1992. 中国地热资源研究的进展[J]. 地球科学进展, 7(3):9-14.
- 陈衍景, 薛莅治, 王孝磊, 赵中宝, 韩金生, 周可法. 2021. 世界伟晶岩型锂矿床地质研究进展[J]. 地质学报, 95(10):2971-2995.
- 陈正山. 2021. 贵州理疗热矿水(温泉)形成机理及其对人群健康的影响[D]. 贵州大学, 1-213.
- 崔玉贵. 2021. 江西于都黄麟地区地热资源地质特征与形成机理[D]. 中国地质大学(北京), 1-76.
- 邓俊祖. 2022. 冀中拗陷北部碳酸盐岩热储水化学特征及成因分析[D]. 东华理工大学, 1-61.
- 多吉. 2003. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征[J]. 中国工程科学, 5(1):42-47.
- 顾晓敏. 2017. 阿尔山泉群地球化学特征及成因演化机制研究[D]. 中国地质大学(北京), 1-132.
- 郭清海. 2022. 岩浆热液型地热系统释义[J]. 地质学报, 96(1):208-214
- 郭唯明, 马圣钞, 孙艳, 赵芝, 钟海仁, 姚垒珊. 2019. 云南腾冲热泉中稀有金属矿化特征及其意义[J]. 地质学报, 93(6):1321-1330.
- 李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12):2269-2282.
- 李明礼. 2018. 西藏典型理疗地热矿泉的成因及功效研究[D]. 成都理工大学, 1-135.
- 李娜. 2020. 四川西昌地区温泉及盐泉的特征及成因[D]. 中国地质大学(北京), 1-81.
- 李泊洋, 姜大伟, 付旭, 王磊, 高树起, 樊志勇, 王可祥, 胡格吉乐吐. 2018. 内蒙古维拉斯托矿区锂多金属矿床地质特征及找矿意义[J]. 矿产勘查, 9(6):1185-1191.
- 李一鸣. 2019. 黑龙江省萝北县肇兴镇地热资源特征及资源量评价[D]. 吉林大学, 1-77.
- 李祎昕, 蒋丽丽, 王超, 王营, 李伯男, 张媛, 赵晓恕, 张言珑, 刘茂川, 张勇. 2022. 三维可视化技术在沈北盆地地热资源开发中的应用[J]. 地质与资源, 31(1):76-80.
- 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 孟祥金. 2005. 藏南上地壳低速高导层的性质与分布:来自热水流体活动的证据[J]. 地质学报, 79(1): 68-77.
- 刘成林, 余小灿, 袁学银, 李瑞琴, 姚佛军, 沈立建, 李强, 赵元艺. 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模[J]. 地质学报, 95(7):2009-2029.
- 刘杰. 2014. 天津地区地热流体地球化学特征[D]. 中国地质大学(北京), 1-72.
- 刘明亮. 2015. 不同热源类型地热系统的地球化学对比——以青海共和地热区和云南热海热田为例[D]. 中国地质大学(武汉), 1-73.
- 刘明亮. 2018. 西藏典型高温水热系统中硼的地球化学研究[D]. 中国地质大学(武汉), 1-94.
- 刘宇. 2020. 云南芒市-瑞丽地区温泉水化学和成因研究[D]. 中国地质大学(北京), 1-78.
- 刘昭. 2014. 西藏尼木-那曲地热带典型高温地热系统形成机理研究[D]. 中国地质科学院, 1-102.
- 路畅. 2019. 首都圈地区流体地球化学特征及成因分析[D]. 中国地震局地震预测研究所, 1-39.
- 马圣钞, 王登红, 孙艳, 李超, 钟海仁. 2019. 我国西南部 T1/T2 粘土岩地质年代学、地球化学特征及其对粘土型锂矿的找矿意义[J]. 地球科学, 44(2):427-440.
- 马鑫, 付雷, 李铁锋, 闫晶, 刘廷, 王明国, 邵炜. 2021. 喜马拉雅东构造结地区地热成因分析[J]. 现代地质, 35(1):209~219.
- 石卓. 2010. 内蒙古赤峰市热水镇地热田热资源评价[D]. 吉林大学, 1-109.
- 舒良树, 朱文斌, 许志琴. 2021. 华南花岗岩型锂矿地质背景与成矿条件[J]. 地质学报, 95(10):3099-3114.
- 宋亮, 孙国强, 程纪星, 朱万锋, 吴国东, 许海州, 蒋执俊. 2022. 土壤化探在谷露地热田高温地热资源勘查

- 中的应用研究[J]. 世界核地质科学, 39(2):330-340.
- 苏丕辉. 2020. 重庆东泉隧道对统景温泉地下水环境影响研究[D]. 西南交通大学, 1-107.
- 孙红丽, 马峰, 蔺文静, 刘昭, 王贵玲, 男达瓦. 2015. 西藏高温地热田地球化学特征及地热温标应用[J]. 地质科技情报, 34(3):171-177.
- 孙艳, 高允, 王登红, 代鸿章, 顾文帅, 李建, 张丽红. 2017. 重庆铜梁地区“绿豆岩”中碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩矿测试, 36(6):649-658.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基风. 2009. 锂同位素分馏机制讨论[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 34(1): 43-55.
- 佟伟, 廖志杰, 刘时彬, 张知非, 由懋正, 章铭陶. 2000. 西藏温泉志[M]. 北京: 科学出版社, 1-259.
- 佟伟, 章铭陶. 1994. 横断山区温泉志[M]. 科学出版社, 1-326.
- 王成辉, 王登红, 陈晨, 刘善宝, 陈振宇, 孙艳, 赵晨辉, 曹圣华, 凡秀君. 2019. 九岭式狮子岭岩体型稀有金属成矿作用研究进展及其找矿意义[J]. 地质学报, 93(6):1359-1373.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 李建康, 王成辉, 娄德波, 杨岳清, 李鹏. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. 地质力学学报, 28 (5):1-24.
- 王登红, 孙艳, 刘喜方, 田世洪, 代晶晶, 刘丽君, 马圣钡. 2018. 锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向[J]. 中国地质调查, 5(1):1-9.
- 王登红, 孙艳, 周四春, 梁婷, 付勇, 付小方, 郝雪峰, 三金柱, 刘喜方, 侯可军, 郭唯明, 田世洪, 李超, 孔维刚, 马圣钡, 郭旭吉. 2021. 锂能源金属矿产基地深部探测技术示范项目进展[J]. 矿床地质, 40(4):641-654.
- 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 雷志远, 廖友常. 2013. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现和综合评价. 中国科学: 地球科学, 43(1):44-51.
- 王贵玲, 蔺文静. 2020a. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 94(7):1923-1937.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 张薇. 2020b. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 27(1):1-9.
- 王贵玲, 陆川. 2022. 碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术进展[J]. 地质与资源, 31(3):412-341.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4):449-459.
- 王贵玲. 2020. 开发地热新能源, 构建清洁低碳、安全高效的能源体系[J]. 地质学报, 94(7):1921-1922.
- 王贵玲等. 2018a. 中国地热志·华北东北西北卷[M]. 北京: 科学出版社, 1-450.
- 王贵玲等. 2018b. 中国地热志·华南卷[M]. 北京: 科学出版社, 1-379.
- 王贵玲等. 2018c. 中国地热志·华中卷[M]. 北京: 科学出版社, 1-579.
- 王贵玲等. 2018d. 中国地热志·西南卷一[M]. 北京: 科学出版社, 1-278.
- 王贵玲等. 2018e. 中国地热志·西南卷二[M]. 北京: 科学出版社, 1-548.
- 王贵玲等. 2018f. 中国地热志·西南卷三[M]. 北京: 科学出版社, 1-172.
- 王核, 黄亮, 白洪阳, 王堃宇, 王振宏, 高昊, 周金胜, 秦艳, 王焰. 2022. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状:评述和展望[J]. 大地构造与成矿学, 46(5):848-866.
- 王花. 2020. 川西理塘地热田高温水化学特征及成因研究[D]. 中国石油大学, 1-59.
- 王思琪. 2017. 西藏古堆高温地热系统水文地球化学过程与形成机理[D]. 中国地质大学(北京), 1-96.
- 王昕昀. 2018. 山东半岛西部温泉水化学特征及成因研究[D]. 中国地质大学(北京), 1-83.
- 王学求, 刘汉粮, 王玮, 周建, 张必敏, 徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布:远景区预测[J]. 地球学报, 41(6):797-806.
- 王卓, 黄冉笑, 吴大天, 许逢明, 孙巍, 张德会, 赵院冬. 2022. 盐湖卤水型锂矿基本特征及其开发利用潜力评价[J]. 中国地质, 1-24.
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 于文修, 顾汉念, 凌坤跃, 崔燧, 李阳, 杨季华. 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. 科学通报, 65(1):53-59.
- 吴儒杰, 孙国强, 万汉平, 谢迎春, 赵丹, 王宗满, 李玲, 李斌. 2022. 土壤氦气测量技术在西藏谷露地热田

- 资源勘查中的应用[J]. 世界核地质科学, 39(1):89-96.
- 肖应凯, 祁海平, 王蕴慧, 金琳. 1994. 青海大柴达木湖卤水, 沉积物和水源水中的锂同位素组成[J]. 地球化学, 23(4):329-338.
- 徐艳秋. 2021. 四川盆地西部边缘地下热水水化学特征及成因研究[D]. 中国地质大学(北京), 1-91.
- 许鹏, 谭红兵, 张燕飞, 张文杰. 2018. 特提斯喜马拉雅带地热水化学特征与物源机制[J]. 中国地质, 45(6):1142-1154.
- 杨妍妍. 2006. 广西博白温罗温泉形成演化与钙华沉积机制研究[D]. 中国地质大学(北京), 1-81.
- 姚双秋, 庞崇进, 温淑女, 梁航, 卢光辉, 尹本纯, 覃丰, 罗桥花. 2020. 桂西上二叠统合山组富锂黏土岩的发现及意义[J]. 大地构造与成矿学, 45(5):951-962.
- 于泓, 于扬, 王登红, 高娟琴, 王成辉, 郭唯明. 2022. 锂同位素地球化学在地热流体水岩反应中的应用——以川西现代富锂热泉研究为例[J]. 岩石学报, 38(2): 472-482.
- 余杰, 毛绪美, 彭慧, 文美霞, 王辛, 范威, 汤伟. 2022. 岩溶热储高矿化度地热流体成因机制研究: 以巴东县盐滩河地热田为例[J]. 中国岩溶.
- 余小灿, 刘成林, 王春连, 徐海明, 赵艳军, 黄华, 李瑞琴. 2021. 江汉盆地大型富锂卤水矿床成因与资源勘查进展: 综述[J]. 地学前缘, 29(01):107-123.
- 余小灿, 刘成林, 王春连. 2020. 锂同位素地球化学在大陆地热体系研究中的应用[J]. 地球科学进展, 35(3):246-258.
- 云南省地质志编纂委员会. 1999. 云南省志卷二十五温泉志[M]. 云南人民出版社, 1-303.
- 张良. 2022. 雄安新区中深层热储水文地球化学特征及成因模式分析[D]. 东华理工大学, 1-55.
- 张磊, 郭丽爽, 刘树文, 杨耀, 施得昉. 2021. 四川鲜水河-安宁河断裂带温泉氢氧稳定同位素特征[J]. 岩石学报, 37(2):589-598.
- 张梦昭, 郭清海, 刘明亮, 刘强. 2022. 山西忻州盆地地热水地球化学特征及其成因机制[J]. 地球科学.
- 张松, 谢迎春, 郝伟林, 高洪雷, 孙国强, 胡先才. 2022. 谷露地热田温度场特征及对下一步勘查的启示[J]. 世界核地质科学, 39(4):733-745.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2):255-268.
- 张雪. 2012. 河北省北部承德地区中低温温泉特征研究[D]. 中国地质大学(北京), 1-71.
- 张颖. 2019. 海南岛温泉特征及成因研究[D]. 中国地质大学(北京), 1-64.
- 张彧齐. 2020. 云南思茅盆地泉水水文地球化学特征及成因研究[D]. 中国地质大学(北京), 1-100.
- 张煜道, 谭红兵, 丛培鑫, 石智伟, 杨俊颖. 2022. 西藏羊八井—当雄断裂带地热系统 B、Li、Rb、Cs 富集机制[J]. 沉积学报.
- 郑绵平, 刘喜方. 2010. 青藏高原盐湖水化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 84(11):1586-1660.
- 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-801.
- 郑伟, 王阳玲, 肖扬, 龚旭, 左焕成, 杨涛. 2021. MT和MT数据频带拼接技术及其在地热资源勘探中的应用[J]. 地质找矿论丛, 36(3):388-394.
- 朱明波, 吴忠如, 王思学, 王立新, 彭惠卿. 2022. 江西省吉泰盆地南洲含锂卤水矿床地质特征及成因探讨[J]. 资源环境与工程, 36(2):142-148.
- 中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心. 2021. 全球锂·钴·镍·锡·钾盐矿产资源储量评估报告[M]. 中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心, 1-7.