

doi: 10.12029/gc20230316002

于扬, 王登红, 王伟, 高娟琴, 王成辉, 于泓, 刘善宝, 阚磊, 岑况, 秦燕. 2025. 不同地质环境中锂的分布特征及生态、环境与生物健康效应[J]. 中国地质, 52(2): 727–744.

Yu Yang, Wang Denghong, Wang Wei, Gao Juanqin, Wang Chenghui, Yu Feng, Liu Shanbao, Kan Lei, Cen Kuang, Qin Yan. 2025. Distribution characteristics and ecological, environmental and biological health effects of lithium in different geological environments[J]. Geology in China, 52(2): 727–744(in Chinese with English abstract).

不同地质环境中锂的分布特征及生态、环境与生物健康效应

于扬¹, 王登红¹, 王伟², 高娟琴³, 王成辉¹, 于泓^{1,4}, 刘善宝¹, 阚磊⁵,
岑况⁴, 秦燕¹

(1. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 四川省地质矿产勘查开发局地质矿产科学研究所, 四川 成都 610036; 3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 5. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要:【研究目的】人与自然和谐共生的新格局影响着地质生态有机系统研究理念, 了解和掌握不同地质环境中锂的分布特征有助于提升锂资源的利用效率, 促进发展方式绿色转型。【研究方法】围绕地质工作需求, 从整体着眼, 通过大量调研、野外采样和理化特性测试分析, 运用多学科交叉研究方法, 最大程度地反映锂在不同地质环境中的分布特征及生态、环境与生物健康效应。【研究结果】①阐明了锂在水圈(海洋底部、地下水、河流、湖泊、冰川融水、雪水、雨水)、岩石圈(大陆地壳、岩石、土壤)、大气圈和生物圈中的区域性及多场耦合作用的分布特征, 分析了锂在不同地质环境区的时空分布特征和区域性差异。②初步总结了各圈层锂元素庞大而复杂的生物、地质和地球化学过程及时空分布格局的影响因素。③充实完善了锂在陆地生物圈关键层中的分布特征, 完善了大型锂资源基地综合评价指标体系, 建立了系统化、定量化评价模型, 评估了人为活动(采矿)影响下地表水、地下水、土壤、优势生物个体(植物、动物骨骼)锂含量的变化特征, 揭示了锂的“关键层”和独特的生态、环境效应, 梳理了锂缺乏与过剩的生物健康效应, 为关键性矿产资源开发、生态文明建设、保障大型资源基地环境安全提供了科学支撑。【结论】不同地质环境中锂的分布特征及生态、环境效应研究表明, 伟晶岩型锂资源开发对生态环境的影响整体安全可控, 黏土型、卤水型锂资源清洁、高效的开发利用目前仍有一些关键问题亟待解决。随着锂成因机理理论难题的深入研究、交叉学科应用基础研究以及模拟技术的应用, 将使锂元素的迁移转化机制研究取得突破性进展。生理量的锂对健康有益, 但生物体内锂过剩会引起一定的副作用甚至毒性反应。因此, 有必要持续开展不同类型锂资源的生态环境与生物健康效应的系统研究, 为我国关键性矿产资源的安全合理开发及生态文明建设提供理论依据。

关键词: 锂; 生态; 环境效应; 生物健康效应; 关键性矿产资源; 环境地质调查工程

创 新 点: (1) 充实完善了各圈层锂的生物、地质和地球化学过程及时空分布特征; (2) 揭示了锂的“关键层”和独特的生态、环境与生物健康效应。

中图分类号: X503; P618.71 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0727-18

收稿日期: 2023-03-16; 改回日期: 2023-05-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2901905, 2021YFC2901900)、中国地质调查局项目(DD20230034、DD20230290、DD20190173)联合资助。

作者简介: 于扬, 女, 1982 年生, 博士, 研究员, 主要从事地球化学研究; E-mail: yuyang_cags@sina.com。

通信作者: 王登红, 男, 1967 年生, 研究员, 主要从事矿床学研究工作; E-mail: wangdenghong@vip.sina.com

Distribution characteristics and ecological, environmental and biological health effects of lithium in different geological environments

YU Yang¹, WANG Denghong¹, WANG Wei², GAO Juanqin³, WANG Chenghui¹, YU Feng^{1,4},
LIU Shanbao¹, KAN Lei⁵, CEN Kuang⁴, QIN Yan¹

(1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Geology and Mineral Resources Scientific Institute of Sichuan Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610036, Sichuan, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Company of CNPC, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. School of Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] The new pattern of harmonious coexistence between humans and nature is influencing the research concept of geological ecological organic systems. Understanding and mastering the distribution characteristics of lithium in different geological environments can help improve the utilization efficiency of lithium resources and promote green transformation of development methods. **[Methods]** Focusing on the needs of geological work, this study analyzed the distribution characteristics, ecological, environmental, and biological health effects of lithium in different geological environments through extensive surveys, field sampling, physical and chemical property testing analysis using interdisciplinary research methods. **[Results]** The regional and multi-field coupling distribution characteristics of lithium in various spheres (hydrosphere: ocean floor, groundwater, rivers, lakes, glacier meltwater, snow water and rain; lithosphere: Continental crusts, rocks and soil; atmosphere and biosphere) were clarified. The spatial-temporal distribution characteristics and regional differences of lithium were analyzed. The influencing factors for complex biological, geological, geochemical processes as well as spatial-temporal patterns for each layer's large amount but complicated elements were preliminarily summarized. The distribution features for key layers with respect to land biosphere was enriched while a comprehensive evaluation index system was improved for large-scale lithium resource bases. A systematic quantitative evaluation model was established to assess changes in lithium concentration on surface water, groundwater, and soil caused under human activities (mining), revealing unique ecological and environmental effects associated with "key layers" along with both lack or excess health effects from lithium. **[Conclusions]** Research on the distribution characteristics and ecological and environmental effects of lithium in different geological environments shows that pegmatite-type lithium resource development has overall safety control over its impact on ecology and environment while there are still some critical issues that need to be resolved regarding clean efficient development and utilization for clay-type and brine-type Lithium resources. With further deepening research into theoretical problems related to lithogenic mechanisms coupled with interdisciplinary basic research applications and simulation technology will make breakthrough progress possible towards understanding migration and transformation mechanisms associated with Lithium elements. While physiological amounts are beneficial to health excessive levels within organisms can cause certain side-effects even toxic reactions so it is necessary to continue conducting systematic studies on eco-environmental and biological health effects across different types and sources of Lithium resources providing theoretical basis support towards safe rational development strategies concerning strategic emerging minerals along with promoting eco-civilization construction efforts within China.

Key words: lithium; ecology; environmental effects; biological health effects; strategic emerging minerals; environmental geological survey engineering

Highlights: (1) The biological, geological and geochemical processes as well as the temporal and spatial distribution characteristics of lithium in each sphere are enriched and perfected. (2) The "key layer" and unique ecological and environmental and biological health effects of lithium were revealed.

About the first author: YU Yang, female, born in 1982, Ph.D., researcher, mainly engaged in the study of geochemistry; E-mail: yuyang_cags@sina.com.

About the corresponding author: WANG Denghong, male, born in 1967, professor, mainly engaged in the study of mineral deposits; E-mail: wangdenghong@vip.sina.com.

Fund support: Supported by Key Research and Development Plan (No.2021YFC2901905, No.2021YFC2901900), the projects of China Geological Survey (No.DD20230034, No.DD20230290, No.DD20190173).

1 引言

人与自然和谐共生的现代化对地球系统科学的研究提出了新的挑战,也赋予了科学研究全新的使命。原有的理论、技术和方法在交叉、融合中实现创新和发展,是地质工作实现高质量发展的重要途径。在新问题、新形势、新需求的牵引下,锂等战略新兴矿产资源的研究已经远超传统单学科意义。作为战略新兴产业矿产地质调查工程的实施主体,必须主动适应时代的发展和研究客体的变化,主动为锂等战略新兴矿产研究领域的科技进步贡献思路,真正做到与时代同步。正是基于这样一种责任和使命,本次研究应运而生。作为“21 世纪的能源金属”,锂(Li)自 1817 年被瑞典化学家 Arfvedson 从透锂长石中发现以来,在人类生产生活中发挥着越来越重要的作用,除了满足全球便携设备、新能源汽车使用的锂离子可充电电池的需求以外,高科技新兴产业领域对 Li 的需求量有增无减。Li 还与生物体健康密切相关,生理量的 Li 对动、植物和人体有益,因此,人类现在的日常生活离不开 Li,从人与自然和谐共生的角度来看,锂可以被称为“改变生活的元素”,在解决人类面临的重大挑战方面将发挥关键作用。

近年来,国内外不同领域的专家学者对 Li 的研究各有侧重,并取得了丰硕的研究成果,可以归纳为以下三个方面:一是,认识和发现 Li 资源。从原子、分子到超分子体系层次上发现自然界(包括地球和宇宙空间)Li 的分布特征(熊大闰, 1992)、赋存状态(张晓宇, 2021)、影响因素(王丽雄等, 2006; 朱学亮, 2007)、时空变化规律(闫宏亮等, 2018)。二是,改造和利用 Li 资源。包括发现和创造含锂的新物质、回收利用 Li 以及拓展 Li 的应用领域(杨雨浓, 1986; 徐肇锡, 1987)。三是,在发现和创新的同时,不断认识和深化 Li 资源的开发利用对生态环境的影响,并通过绿色调查等途径实现对生态环境和锂资源的保护(杨师, 2000; 汪齐连等, 2008; 于扬等,

2019, 2021; Wang et al., 2020)。本文首次总结了全球尺度不同地质环境中 Li 的含量和分布特征,阐述了 Li 资源开发的生态环境影响,并分析了 Li 的生物健康效应。

2 地球外部圈层中锂的分布特征

2.1 大气圈中的锂

锂(Li)位于化学性质非常活泼的碱金属族,是世界上最轻的金属,是固体元素中密度最小的元素,也是宇宙大爆炸中形成的三种元素之一。Li 的化学性质非常活跃,有两种稳定的同位素 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$,他们分别从温度 $2.0\times 10^8\text{ K}$ 和 $2.5\times 10^8\text{ K}$ 开始,因同质子的核反应而毁坏。对于晚型星,对流将恒星表层的物质带入高温的内部,当对流区足够深,恒星大气锂就会因内外物质的对流混合而逐渐衰减。因此恒星大气锂的丰度提供了一种追踪恒星各个演化阶段对流区演化的重要线索,从而成为检验恒星对流与演化理论的一个很敏感的限制条件(熊大闰, 1992)。Li 在恒星演化过程中对较低温度下的热核反应敏感(王丽雄等, 2006),其精确的丰度可以检验宇宙大爆炸学说(张晓宇, 2021),并可提供恒星、银河系早期演化的重要信息,因此恒星大气中 Li 的丰度受到国内外天文学家的广泛关注。Li 元素是能在大爆炸中形成的少数几种元素之一,它在研究宇宙的形成历史、核合成理论、恒星的内部结构与演化等方面有着非常重要的作用和地位(朱学亮, 2007)。

在天体物理环境中, Li 是一种十分容易被消耗的元素,因其在温度超过 200 万 K 时,就容易通过俘获质子发生反应而被分解成氦(闫宏亮等, 2018)。目前人们主要利用光谱观测技术 670.8 nm 共振线及 610.4 nm 谱线确定恒星大气 Li 的化学丰度(黄润乾, 1999),大气锂的丰度随着有效温度的降低而呈现减少的趋势。自 Wallerstein and Sneden (1982)偶然发现富锂巨星以来,天文界对富锂巨星的研究不断升温,闫宏亮和施建荣(2018)利用郭守敬望远

镜(LAMOST)海量光谱的收集能力发现了一颗人类已知的 Li 丰度最高的巨星($A_{\text{Li}}=4.51$, 其中 $A_{\text{Li}}=\log(N_{\text{Li}}/N_{\text{H}})+12$, N_{Li} 和 N_{H} 分别是 Li 和 H 元素的数密度),这颗名为 TYC429-2097-1 富锂巨星的 Li 元素含量是普通巨星的 3000 倍左右,对其理论的解释研究已在《Nature Astronomy》发表。

除恒星大气外,地球大气气溶胶中的 Li 的含量及同位素比值也是近年来的研究热点。大气圈中的 Li 的主要来自火山喷发、海洋气溶胶、风成尘土以及燃煤等(Schlesinger et al., 2021),其中,燃煤是大气圈中 Li 最主要的人为源。据估算,平均每年约有 55×10^9 g 的 Li 随燃煤产生的气溶胶进入大气圈(Schlesinger et al., 2021)。据海洋气溶胶的总量以及海水中 Li 的平均浓度估算,海洋气溶胶进入大气圈的 Li 的量约为每年 $26\times 10^9\sim 52\times 10^9$ g(Stoffynegli et al., 1984)。风成尘土中的 Li 浓度因其来源的不同而存在差异,浓度范围 $17\times 10^{-6}\sim 41\times 10^{-6}$ (Teng et al., 2004; Liu et al., 2013),据此估算由风成尘土进入大气圈的 Li 约为每年 38.4×10^9 g,而每年通过火山喷发进入大气圈的 Li 约为 11×10^9 g(Schlesinger et al., 2021)。因此,海洋气溶胶和风成尘土是支配着 Li 进入大气圈的主要因素。王丽雄等(2006)采用锂同位素示踪技术测得气溶胶中 $^6\text{Li}/^7\text{Li}$ 比值为 0.082。张宏峰等(2017)采用超声辅助提取—电感耦合等离子体质谱(UAE-ICP-MS)法测定广州市区大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)中 Li 含量为 1.12 ng/m^3 。陈晓静等(2014)利用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定了青岛近海大气总悬浮颗粒物(TSP)样品锂含量为 7.4 ng/m^3 。李磊等(2016)采用 ICP-MS 方法测定贵阳市南明区及花溪区大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)中 Li 含量为 0.03 ng/m^3 。Beddows et al.(2004)采用气溶胶飞行时间质谱测量了苏格兰埃斯克代尔缪尔大气颗粒中锂气溶胶颗粒约占 2.0%~2.7%。Jean et al.(1980)利用雷达测量上普罗旺斯天文台大气中 Li 颗粒物浓度时发现,85~100 km 的高度层大气颗粒物中 Li 的浓度最大。

2.2 水圈中的锂

2.2.1 河流

Li 的原子序数是 3,电离势低,外层电子易失去而呈 1 价阳离子,因为反应活性很高,金属 Li 遇水会剧烈发生反应,漂浮在水面上四处跳动。Li 在不

同地质环境中不以单质形式存在,在整个表生作用过程中锂的分散性比内生作用强(Gaillardet et al., 2014)。在表生环境河流系统中,含 Li 物质主要包含河流溶解相、河流悬浮物和河流沉积物三大类。虽然河水中溶解态 Li 的浓度相对较低,但世界范围内各河流系统之间溶解态 Li 的浓度差别较大,从 0.1×10^{-9} 到 1163×10^{-9} 均有出现,相差达 3~4 个数量级。据刘英俊(1984)统计,河水中锂的平均含量为 $(23\pm 11)\times 10^{-9}$,变化在 $0.1\times 10^{-9}\sim 400\times 10^{-9}$ 。Gaillardet et al.(2014)报道了世界河流 Li 含量平均值为 1.84×10^{-9} 。

在不同地区的河流系统中,东南亚及南亚地区河流因流域盆地的物理—化学侵蚀较强烈,流域地质背景以碳酸盐岩和硅酸盐岩为主,溶解态 Li 含量相对较低,加之东南亚及南亚地区河流多为碱性,较高的 pH 值使得富 Li 的胶体物质在河流系统中迁移比较困难,大量泥沙沉降过程带走了部分胶体,从而使河流中溶解态 Li 的浓度相对较低。如恒河的溶解态 Li 含量为 2.62×10^{-9} (Manaka et al., 2017),尼泊尔 Indrawati 河 Li 含量值仅为 1.53×10^{-9} (Sharma et al., 2015)。

欧美一些国家人口密集区和工业化程度较高地区河流溶解态 Li 含量相对较高,如英国的泰晤士河 Li 含量值为 11.20×10^{-9} (Neal et al., 2000);北美的密西西比河溶解态 Li 含量值为 10.00×10^{-9} ,马更些河溶解态 Li 含量值为 4.60×10^{-9} (Gaillardet et al., 2014)。北美其他地区主要河流如哥伦比亚河、亚马逊河中溶解态 Li 含量值相对较低,介于 $0.35\times 10^{-9}\sim 1.46\times 10^{-9}$;南美一些河流如 Madeira(马代拉河)、卡罗尼河等溶解态 Li 含量值也相对较低,介于 $0.16\times 10^{-9}\sim 1.18\times 10^{-9}$ (Gaillardet et al., 2014)。北亚地区主要河流溶解态 Li 含量也相对较低,如 Lena 河 Li 含量值为 2.13×10^{-9} (Yoon, 2010),塞伦加河溶解态 Li 含量值为 3.40×10^{-9} ,上安加拉河溶解态 Li 含量值为 1.09×10^{-9} ,巴尔古津河溶解态 Li 含量值为 1.77×10^{-9} (Gaillardet et al., 2014)。

东亚一些国家的河流如金沙江、长江、雅鲁藏布江等流域溶解态 Li 含量相对较高。本次工作测得中国西南地区金沙江溶解态 Li 含量平均值为 47.02×10^{-9} ,桑干河溶解态 Li 含量平均值为 42.40×10^{-9} ,雅砻江溶解态 Li 含量平均值为 6.79×10^{-9} ,九

龙河溶解态 Li 含量平均值为 6.45×10^{-9} , 大渡河溶解态 Li 含量平均值为 4.75×10^{-9} , 踏卡河溶解态 Li 含量平均值为 3.04×10^{-9} 。在川西九龙地区采集的 60 件样品中溶解态 Li 含量高达 20.1×10^{-9} , 是亚洲最大的已开采的甲基卡锂矿区地表水体 Li 含量平均值的 2 倍。九龙地区子耳乡河溶解态 Li 含量相对较高, 平均值为 8.62×10^{-9} (于扬等, 2021)。笔者团队对中国川西河流及流经伟晶岩脉分布区域的河流的溶解态 Li 含量进行了对比研究, 川西河流溶解态 Li 含量平均值为 4.02×10^{-9} , 流经含矿脉区域河流水体中溶解态 Li 含量平均值为 13.06×10^{-9} (高娟琴等, 2019)。蒋超等 (2023) 测得雅鲁藏布江的支流雅砻河中 Li 含量平均浓度高于 10×10^{-9} , 认为锂元素可能来自热泉补给, 同时与流域丰富的矿产资源有关。在表生环境中, 原岩在风化作用下发生分解, 部分 Li 从矿物晶格中析出, 锂离子与卤族元素化合成 LiCl 等可溶盐, 随河流系统迁移。Wu et al. (2009) 报道了长江 (南京段) 水体溶解态 Li 含量为 14.1×10^{-9} 。吴炯等 (2023) 对长江流域赤水河中 Li 的时空特征和主要来源进行了研究, 认为锂在中游浓度最高 (3.71×10^{-9}), 主要受天然地质背景和城市人为输入影响。汪齐连等 (2008) 对长江干流和主要支流水体的 Li 及同位素组成的研究表明, 长江流域水体中 Li 主要来自蒸发盐岩 (伴有深部热水) 和硅酸岩两个端元混合。

本文测得中国华东地区的主要河流溶解态 Li 含量也相对较高, 如赣江溶解态 Li 含量平均值为 12.75×10^{-9} , 贡水溶解态 Li 含量平均值为 17.34×10^{-9} , 漳水溶解态 Li 含量平均值为 12.06×10^{-9} , 桃江溶解态 Li 含量平均值为 4.28×10^{-9} , 寻乌水溶解态 Li 含量平均值为 3.77×10^{-9} 。华中和华北地区主要河流溶解态 Li 含量较低, 如漳卫新河溶解态 Li 含量平均值为 0.05×10^{-9} , 马颊河、德惠新河、徒骇河溶解态 Li 含量平均值均为 0.03×10^{-9} (蔡文静等, 2013)。笔者团队测得中国西北地区的主要河流水体中溶解态 Li 含量也相对较高, 新疆乌伦古河溶解态 Li 含量平均值为 14.99×10^{-9} , 阿勒泰地区额尔齐斯河溶解态 Li 含量平均值为 4.68×10^{-9} 。季雨桐等 (2021) 分析了青海湖沙柳河流域地表水中 Li 含量为 30×10^{-6} 。河流系统锂含量与流域岩性变化有关, 有研究表明锂元素异常可视为水化学找矿标志 (于

扬等, 2019), 河流水体锂元素对地表及深部矿脉的存在具有明显响应, 可缩小找矿靶区。

相对于河流溶解态 Li 而言, 河流悬浮物、沉积物中的 Li 含量受流域岩性变化、风化作用程度和水土流失强度等因素的影响, 浓度要高得多。王立军等 (1998) 研究了珠江广州段河流沉积物 Li 含量 (32.5×10^{-6}) 和悬浮物 Li 含量 (51.7×10^{-6}) 及分布特征, 并与长江和黄河 Li 含量进行了比较, 认为 Li 在珠江沉积物中的含量介于长江与黄河之间, 且基本以残渣态存在, 占比 95%。长江干流悬浮物与水体之间的锂同位素分馏效应沿上游至下游逐渐增大, 水体和悬浮物之间的 Li 同位素分馏与黏土矿物的吸附、解吸过程以及悬浮量、悬浮物组成存在密切关系 (汪齐连等, 2008)。河流悬浮物因其继承了源区特征, 又反映了迁移转化趋势, 一直以来是研究区域地质演化的有效指标, 其中 Li 同位素示踪硅酸岩风化一直以来都是水文界的研究热点。张飞等 (2022) 开展了全球河流和海洋 Li 同位素的大数据组网研究, 认为全球一致的 $\delta^7\text{Li}$ 变化反映了水岩反应时间的变化, 在不同时间尺度上, 河流系统和海水的 $\delta^7\text{Li}$ 均受水文作用主导, 并与硅酸岩风化紧密关联。水-岩作用过程是锂 (Li) 同位素分馏的主要过程, 分馏的结果是 ^6Li 优先进入固相, 而 ^7Li 则富集于液相 (汪齐连等, 2008)。流域侵蚀过程的研究表明河水锂同位素组成可以反映流域化学风化速率的变化 (Wang et al., 2015)。

2.2.2 湖泊

湖泊是内陆水体供水的主体, 湖泊中 Li 含量随湖泊的地质、地理、气候、水体理化和水生系统特征差异而呈现明显变化 (王卓等, 2023)。加拿大的 24 个湖水样品中溶解态 Li 含量介于 $85 \times 10^{-9} \sim 95 \times 10^{-9}$, 贝加尔湖水体溶解态 Li 含量为 2.04×10^{-9} (Gaillardet et al., 2014)。中国湖泊众多, 大于 1 km^2 的湖泊有 2300 多个 (吴丰昌等, 2008), 水-岩作用、地下蒸馏、沸腾、蒸发结晶作用使得中国西北山地盆地各个湖泊或盐湖锂含量具显著差异, 在蒸发湖水中 Li 的含量较高, 达 $1200 \times 10^{-9} \sim 8500 \times 10^{-9}$ (Deocampo et al., 2014)。

中国西北部地区的湖泊多为咸水湖泊, 青海大柴达木湖卤水和温泉水中 Li 的含量分别为 84.9×10^{-6} 和 3.50×10^{-6} (肖应凯等, 1994), 玉树勒斜武担湖

Li 的含量介于 $47.00 \times 10^{-6} \sim 103.1 \times 10^{-6}$, 有研究表明, 该区广泛分布的火山岩造成湖泊 Li 含量异常高的原因(韩继龙, 2018)。笔者团队测得新疆阿勒泰地区湖泊水体溶解态 Li 含量也异常高, 介于 $19.9 \times 10^{-9} \sim 2175 \times 10^{-9}$, 平均值为 641.32×10^{-9} 。

中国东部地区的湖泊多为大型浅水湖泊, 针对这类湖泊锂的研究多侧重于河口区表层沉积物及沉积岩心。陆敏等(2003)报道了太湖北部柱状沉积物 Li 的平均含量为 $(55.6 \pm 7.45) \times 10^{-6}$, 并分析了其垂向分布特征, 认为 Li 主要在黏土中富集, 且垂向变化主要受黏土含量控制。杜臣昌等(2012)分析了巢湖西部湖心区沉积岩心中 Li 的平均含量为 39.67×10^{-6} 。

中国北方及中部多为碱性湖泊, 但针对这些湖泊水体中锂的含量及分布特征鲜有报道, 中国五大连池湖水中溶解态 Li 含量为 0.01×10^{-9} (贺军等, 2012; 林琳等, 2019)。中国西部多为高原湖泊(海子), 笔者团队测得了川西甲基卡地区多个高原海子的溶解态 Li 含量, 如甲基措海子溶解态 Li 含量为 3.72×10^{-9} , 西日海子溶解态 Li 含量为 7.62×10^{-9} , 哲西措海子溶解态 Li 含量为 6.92×10^{-9} (高娟琴等, 2019)。

2.2.3 海水

海水中 Li 的含量相对富集, 太平洋海水中锂的含量为 0.17×10^{-6} , 海水中锂的平均值为 0.19×10^{-6} , 在水圈中, 海洋底部各端元锂含量存在较大差异, 热液流体 ($4 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$)、海底孔隙水 ($54.14 \times 10^{-6} \sim 34406 \times 10^{-6}$)、海底热液沉积物 ($4.80 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$) 变化范围大, 普遍高于现代海水锂含量 (0.18×10^{-6})(Bruland et al., 2014)。

2.2.4 地下水

地下水中的 Li 含量与介质的酸碱度有密切关系, 即地下水中的 Li 离子含量随 pH 值的增大而升高, 呈幂函数关系(曾昭华等, 1995)。地下水 Li 含量达到 0.2×10^{-6} 以上可以命名为天然矿泉水(国家标准《饮用天然矿泉水》(GB8537—2018)规定)。热泉水锂的含量为 $8.2 \pm 0.4 \times 10^{-6}$, 变化在 $0.01 \times 10^{-6} \sim 27 \times 10^{-6}$ (刘英俊, 1984)。地热水中的 Li 含量一般比普通地下水高, 因此可以作为追索热水上升通道或隐伏水热区的一种标志。地热水锂含量高于普通地下水, 受热源和构造控制, 研究表明, 青藏高原

热泉锂含量 $12.7 \times 10^{-6} \sim 239 \times 10^{-6}$, 部分达工业品位, 具重要找矿意义(于沅等, 2022)。曾昭华(1995)测得长江中下游鄱阳湖区地下水中 Li 含量介于 $7.50 \times 10^{-9} \sim 73.18 \times 10^{-9}$ 。

中国温泉水中 Li 的含量也相对较高, 明香温泉 Li 含量 1260×10^{-9} , 金汤湾海水温泉 Li 含量 1760×10^{-9} , 日多温泉 Li 含量 2240×10^{-9} (王祝等, 2015), 其他已报道温泉水锂含量介于 $59 \times 10^{-9} \sim 671 \times 10^{-9}$ (周海燕等, 2008; 叶实现等, 2009; 康明亮等, 2010; 周小龙, 2010; 张雪等, 2010; 肖尧等, 2016; 申晓伟, 2017)。笔者团队在川西热坑采集的温泉水样品中 Li 含量高达 2180.25×10^{-9} 。

2.2.5 大气水

雪水和雨水 Li 含量很低, 青海大柴达木湖融雪 Li 含量 8.0×10^{-9} , 雨水 Li 含量 1.0×10^{-9} (肖应凯等, 1994)。

2.3 生物圈中的锂

2.3.1 植物

植物中 Li 的含量只有土壤中 Li 含量的十分之一到几十分之一, 毛桦树皮及叶子中 Li 的含量达 $60 \times 10^{-6} \sim 74 \times 10^{-6}$, 牧草中 Li 的含量为 $0.05 \times 10^{-6} \sim 0.15 \times 10^{-6}$ (刘英俊, 1984)。笔者团队系统分析了甲基卡稀有金属资源富集区、尾矿影响区、无矿业活动区南方雪层杜鹃的根、茎叶中 Li 含量, 与已报道的世界植物平均值相比, 甲基卡矿田杜鹃植物具有更高的 Li 含量(高娟琴等, 2019), 本研究表明稀有金属资源富集区杜鹃植物根中 Li 含量高达 22.9×10^{-6} 。分析表明腐植层中 Li 的含量较深层土壤富, 这与植物富集锂的作用相关。叶菜类、根菜类和水果中 Li 含量相对较多(杨师, 2000)。中药药材中 Li 含量差别较大, 野菊花中 Li 含量相对较高 (18.35 ± 0.86) $\times 10^{-6}$, 金银花中 Li 含量为 $(12.01 \pm 2.61) \times 10^{-6}$, 连翘中 Li 含量为 $(24.6 \pm 3.25) \times 10^{-6}$, 羌活和邹花细辛中 Li 含量相对较高, 分别为 4.00×10^{-6} 和 3.60×10^{-6} , 北柴胡 Li 含量 0.93×10^{-6} , 防风中 Li 含量为 0.52×10^{-6} (李增禧等, 2013a, b, c, d)。茶叶中含有多种有机成分以及人体必需的微量元素, 锂是其中之一, 不同产地不同品类茶叶中 Li 含量差别较大, 介于 $0.08 \times 10^{-6} \sim 0.45 \times 10^{-6}$ (李增禧等, 2013c, d)。

2.3.2 人体(生物)

锂缺乏和过剩也会对生物体产生不同程度的

影响。有研究表明,人对锂的饮食需求量约为每天 60~100 μg , Li 在人和动物组织中含量低,能顺利通过胎盘和乳汁进入胎儿和婴儿体内,在胃肠道吸收快而完全,迅速分布于全身整个体液中,主要通过肾脏排出体外,一般情况下不会造成体内蓄积中毒,人体具有维持锂代谢平衡的能力,水和电解质平衡对 Li 的排出影响显著(杨师, 2000)。Li 可以抑制甲状腺激素的释放以及胶体微粒的形成,头发中 Li 含量较低是甲亢形成的一个因素,且在治疗之后头发 Li 含量比治疗前明显增加(林碧霞等, 1991; 陈青云等, 1995)。再生障碍性贫血患者头发中 Li 含量与血红蛋白、红细胞数量呈负相关,而血清和骨髓 Li 与血红蛋白、红细胞数量关系不大(余永卫等, 1995)。头发中 Li 含量非常低,为了提高所测数据的可信度,可采用液/液萃取法预富集痕量锂(王仕芳等, 2010)。分析表明,心脏病患者、学习低能者、在押暴力犯 Li 摄入不足(Schrauzer et al., 1992)。此外, Li 对血液系统也有很多作用,在健康人体中, Li 不影响淋巴细胞和粒细胞功能,给造血系统正常的人服用 Li, 结果血中血小板有减少倾向并伴有成熟中性粒细胞增多。在一些哺乳类中, Li 能增加某些类型的造血干细胞,尤其是那些能生成中性粒细胞和巨噬细胞的细胞(陈有和等, 2008)。

2.3.3 动物(生物)

笔者团队近年来对川西甲基卡稀有金属矿田的动物样品锂含量进行了分析, 研究结果表明, 牛粪中 Li 含量变化于 3.39×10^{-6} ~ 37.80×10^{-6} , 平均含量为 11.98×10^{-6} ; 牛毛 Li 含量变化于 0.95×10^{-6} ~ 21.5×10^{-6} ; 牛骨样品 Li 含量变化于 0.96×10^{-6} ~ 13.47×10^{-6} , 平均值为 4.65×10^{-6} , 为前人研究中红骨山羊骨骼样品 Li 含量的 2.26~31.69 倍。

3 地球内部圈层中锂的分布特征、迁移规律及控制因素

3.1 岩矿石中锂的分布特征、迁移规律及控制因素

Li 在地壳中的分布极为广泛, 其平均含量为 25×10^{-6} , 在侵入岩中 Li 的含量从超基性岩(2×10^{-6})、基性岩(15×10^{-6} ~ 18×10^{-6})、中性岩(28×10^{-6})和酸性岩(30×10^{-6} ~ 55×10^{-6})依次升高, 某些黑云母花岗岩中 Li 的含量较高(33×10^{-6} ~ 190×10^{-6}), 外贝

加尔地区黑云母中锂的含量高达 900×10^{-6} (刘英俊, 1984)。中国各类岩石中 Li 的平均含量为 29.22×10^{-6} , 变质岩中 Li 的含量相对最高(32.30×10^{-6}), 其次是沉积岩(31.45×10^{-6})、火山岩(22.92×10^{-6}), 侵入岩中 Li 的平均含量最低, 为 25.22×10^{-6} (刘英俊, 1984), 但均高于地壳克拉克值(18×10^{-6}), 是球粒陨石的 10 倍(Seitz et al., 2007)。在侵入岩中, Li 的含量从超基性岩(12.79×10^{-6})、基性岩(21.03×10^{-6})、中性岩(22.32×10^{-6})到酸性岩(26.35×10^{-6})依次升高, 其中加里东期(31.19×10^{-6})、印支期(30.96×10^{-6})、喜山期(30.76×10^{-6})和燕山期(27.18×10^{-6})花岗岩类岩石中锂含量相对高于其他期次(王学求等, 2020)。

在伟晶作用中 Li 可以形成独立矿物, 并可形成有工业价值的矿床(王登红等, 2013, 2016, 2017, 2019; 王登红, 2020; 王成辉等, 2022), 在花岗伟晶岩中, Li 含量可达 2700×10^{-6} ~ 6900×10^{-6} (刘英俊, 1984)。沉积地层中 Li 含量从泥质岩(55.95×10^{-6})、钙质泥质岩(49.50×10^{-6})、粉砂质泥质岩(48.98×10^{-6})到泥灰岩(46.59×10^{-6})依次降低。从时代上来看, 太古宙(18.76×10^{-6})、古近纪和新近纪(27.13×10^{-6})、二叠纪(27.93×10^{-6})、元古宙(28.04×10^{-6})、奥陶纪(29.33×10^{-6})、志留纪(31.63×10^{-6})、侏罗纪(31.85×10^{-6})、白垩纪(32.09×10^{-6})、寒武纪(32.92×10^{-6})、石炭纪(33.19×10^{-6})、三叠纪(33.32×10^{-6})地层 Li 的平均含量依次升高(王学求等, 2020)。

目前已知的锂矿物和含锂矿物有 150 多种, 其中常见的主要锂矿物有锂辉石、锂云母、锂磷铝石、透锂长石、铁锂云母等(刘英俊, 1984)。锂辉石是一种混合的硅酸盐矿物, 从锂辉石中回收锂常用的方法是硫酸法和石灰法, 硫酸法是主流(徐肇锡, 1987)。锂是典型的亲岩元素, 在热液硫化物阶段锂并非特征元素, 因此在与热液相关的金属硫化物矿床中锂的含量很低, 甚至缺失(郑亚新等, 1988)。同时, 锂在许多偏硅酸盐矿物中均有分布, 由于 Li 与 Mg 的结晶化学性质相似, 能在自然界镁、铁硅酸盐矿物中广泛产生类质同象置换, 所以在风化壳土壤中尤其是黏土质矿物中含锂量较高(刘英俊, 1984)。岩浆作用中锂主要以氯化物或氟化物络合物迁移, 镁铁硅酸盐矿物构造及岩体中挥发分的富

集制约着锂的地球化学行为;伟晶作用中锂的迁移与富集规律与伟晶岩类型和不同地球化学阶段密切相关;而在气成-热液作用及热液作用中锂的迁移转化规律复杂,特别是与碱性岩有关的气成-热液交代作用中锂的地球化学行为、迁移规律及控制因素还有待深入研究(刘英俊, 1984)。

3.2 土壤中锂的分布特征、迁移规律及控制因素

鉴于 Li 的化学性质活泼,在不同地质环境中不以单质形式存在,而多以化合物形式出现于一些矿物质中,而不同地质背景、自然环境、地理景观条件以及矿物类型的不同,使得 Li 在土壤中的分布特征存在巨大差异。土壤中锂的含量变化在 $0.11 \times 10^{-6} \sim 0.69 \times 10^{-6}$, 平均含量为 0.31×10^{-6} , 在红土中锂的含量较少,而黑色土、森林土、灰化土和栗色土中锂含量较高,为 $10 \times 10^{-6} \sim 56 \times 10^{-6}$ (刘英俊, 1984)。一般由基性岩形成的土壤中锂含量较低,在花岗岩形成的土壤中锂含量较高,特别在含锂云母的锂辉石及其他锂矿物的矿床区域内所属的土壤中,锂含量最高,因此可以用土壤中锂的含量来寻找原生锂矿床(刘英俊, 1984)。一般在风化作用中不形成单独的锂矿物,只有在内生矿床的氧化带中可以形成锂锰土。土壤中锂含量变化复杂,对苏格兰土壤中锂含量的研究表明,不同岩石分解形成的土壤中锂的含量各异,如蛇纹岩分解的土壤中锂含量为 30×10^{-6} , 橄榄辉长岩为 30×10^{-6} , 安山岩为 50×10^{-6} , 花岗岩为 7×10^{-6} , 花岗片麻岩为 70×10^{-6} , 石英云母片岩为 200×10^{-6} , 页岩为 60×10^{-6} , 砂岩为 20×10^{-6} , 石英岩为 15×10^{-6} , 不同深度锂含量不同,在上部土壤中锂含量达 $20 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$, 在下部近花岗质基岩的土壤中锂含量为 $150 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ (刘英俊, 1984)。研究表明,土壤中锂含量的变化除与原岩锂含量的有关外,常与土壤中黏土矿物含量密切相关。

在整个表生作用中,锂的分散性比内生作用强,锂容易被黏土吸附,并限制了它的迁移性质,只有少量锂以活动离子形式或悬浮胶体状态迁移(刘英俊, 1984)。中国 30 多年来完成的 760 万 km^2 区域化探扫面工作、近 20 年完成的全国多目标区域地球化学调查工作以及近 10 年来完成的覆盖西南三江北段、冈底斯、西昆仑、西天山、阿尔金、大兴安岭等主要成矿区带的高精度区域化探工作,查明

了土壤 Li 含量在强度、元素组合等方面均有不同(奚小环等, 2013)。相对于全球上地壳丰度,中国土壤(第一环境)Li 的背景值(35×10^{-6})显著高于全球上地壳丰度值(21×10^{-6})。中国南方至北方各大流域土壤 Li 含量相对于全球丰度及中国土壤背景值的变化特征明显。长江流域土壤 Li 含量(42×10^{-6})高于黄河流域土壤 Li 含量(33.00×10^{-6})和珠江流域土壤 Li 含量(33.00×10^{-6}), 高于辽河流域土壤 Li 含量(25.00×10^{-6}), 显著高于全球上地壳丰度(呼文亮, 2006b)。但相对于中国土壤背景值而言,只有长江流域土壤 Li 含量超过了中国土壤背景值,其余三大流域土壤 Li 含量均低于全国背景值。世界范围内关于不同成矿域、成矿省、成矿带、矿田与矿床等不同级次不同尺度土壤中 Li 的迁移富集过程的研究,获取了海量的土壤 Li 含量数据,而导致全球土壤 Li 含量差异性分布的重要因素之一是全球壳幔运动以及物质循环过程。2019 年笔者团队在川西甲基卡、九龙地区开展了土壤地球化学测量工作,测得甲基卡矿集区 671 件土壤样品 Li 含量平均值为 59.28×10^{-6} , 是中国 A 层土壤背景值(30×10^{-6})的 1.98 倍,川西九龙地区 1125 件土壤样品 Li 含量平均值为 96.20×10^{-6} , 是中国 A 层土壤背景值的 3.21 倍。大量研究表明,成矿地球化学省是初始阶段成矿物质的重要来源,针对中国 Li 地球化学省空间分布研究的采样介质多为汇水域沉积物,在全国范围内新发现了多处 Li 异常,研究成果对找矿勘查工作具有重要指导意义,鉴于水系沉积物严格意义上有别于土壤,故本文暂未做统计分析。以上分析引用的数据详见表 1。

4 锂的生态环境效应

4.1 锂的水环境效应

因 Li 很容易被风化作用中形成的黏土矿物吸附,在风化壳土壤中,尤其是黏土质矿物中含锂较高,风化作用中成溶解态的 Li 一部分可随地表径流迁移(刘英俊, 1984)。锂的开发利用会产生一系列生态和环境效应,不论是伟晶岩型锂资源、黏土型锂资源(包括火山岩黏土型和含铝系黏土型)、还是卤水型锂资源,锂资源开发利用所在的径流携带的污染物负荷(颗粒物、重金属、污染离子等)是否导致地表水污染,从而影响水生环境健康,甚至对地

表 1 锂在不同介质中的含量

Table 1 Concentration of Lithium in different media

介质	Li元素 平均浓度	资料来源	介质	Li元素 平均浓度	资料来源
地壳	25×10^{-6}		Lena勒拿河	1.33×10^{-9}	
陆壳	32×10^{-6}		长江	3.44×10^{-9}	
洋壳	7×10^{-6}		Ganges恒河	3.47×10^{-9}	Gaillardet et al., 2014
超基性侵入岩	2×10^{-6}		布拉马普特拉河	2.61×10^{-9}	
基性侵入岩	$15 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6}$		世界河流平均值	1.84×10^{-9}	
中性侵入岩	28×10^{-6}		密西西比河	10.00×10^{-9}	
酸性侵入岩	$30 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$		漳卫新河 (中国)	0.05×10^{-9}	
沉积岩	31.45×10^{-6}		马颊河 (中国)	0.03×10^{-9}	蔡文静等, 2013
火山岩	22.92×10^{-6}		德惠新河 (中国)	0.03×10^{-9}	
花岗伟晶岩	$2700 \times 10^{-6} \sim 6900 \times 10^{-6}$		徒骇河 (中国)	0.03×10^{-9}	
土壤	31×10^{-6}		川西河流平均值	4.02×10^{-9}	高娟琴等, 2019
黑色土、森林土、灰化土	$56 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$	刘英俊, 1984	泰晤士河	11.20×10^{-9}	Neal et al., 2000
蛇纹岩分解土壤	30×10^{-6}		尼泊尔Indrawati河流	1.53×10^{-9}	Sharma et al., 2015
橄榄辉长岩分解土壤	30×10^{-6}		Lena勒拿河	2.13×10^{-9}	Yoon, 2010
安山岩分解土壤	50×10^{-6}		安宁河 (中国)	0.5×10^{-9}	
花岗岩分解土壤	7×10^{-6}		白河 (中国)	0.98×10^{-9}	
花岗片麻岩分解土壤	70×10^{-6}		大渡河 (中国)	4.75×10^{-9}	
石英云母片岩分解土壤	200×10^{-6}		都江堰 (中国)	5.72×10^{-9}	
页岩分解土壤	60×10^{-6}		额尔齐斯河 (中国)	4.68×10^{-9}	
砂岩分解土壤	20×10^{-6}		涪江 (中国)	2.6×10^{-9}	
石英岩分解土壤	15×10^{-6}		赣江 (中国)	12.75×10^{-9}	
泥炭、潜育土、灰化土上部	$20 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$		贡水 (中国)	17.34×10^{-9}	
泥炭、潜育土、灰化土下部	$150 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$		嘉陵江 (中国)	1.76×10^{-9}	
碳质球粒陨石	1.7×10^{-6}	Seitz et al., 2007	金沙江 (中国)	47.02×10^{-9}	
普通球粒陨石	1.8×10^{-6}		九龙河 (中国)	6.45×10^{-9}	本文
甲基卡矿田土壤	3.42×10^{-6}	高娟琴等, 2019	喀依特河 (中国)	4.34×10^{-9}	
风成尘土	$17 \times 10^{-6} \sim 41 \times 10^{-6}$	Teng et al., 2004; Liu et al., 2013	桑干河 (中国)	42.4×10^{-9}	
热泉水	$(8.2 \pm 0.4) \times 10^{-6}$	刘英俊, 1984	踏卡河 (中国)	3.04×10^{-9}	
啦井温泉 (中国)	605×10^{-9}		桃江 (中国)	4.28×10^{-9}	
新和温泉 (中国)	351×10^{-9}	郑亚新等, 1988	乌伦古河 (中国)	14.99×10^{-9}	
马登温泉 (中国)	246×10^{-9}		寻乌水 (中国)	3.77×10^{-9}	
武山温泉 (中国)	361×10^{-9}	周小龙, 2010	雅砻江 (中国)	6.79×10^{-9}	
明香温泉 (中国)	1260×10^{-9}	肖尧等, 2016	漳水 (中国)	12.06×10^{-9}	
金汤湾海水温泉 (中国)	1760×10^{-9}	叶实现等, 2009	子耳乡河 (中国)	8.62×10^{-9}	
塘子庙温泉 (中国)	671×10^{-9}		贝加尔湖	2.04×10^{-9}	Gaillardet et al., 2014
杨树沟地热井 (中国)	205×10^{-9}		五大连池 (中国)	0.01×10^{-9}	贺军等, 2012
砬子底下地热井 (中国)	274×10^{-9}	申晓伟等, 2017	湖水	$0.085 \times 10^{-6} \sim 0.095 \times 10^{-6}$	
塘泉沟温泉 (中国)	44.4×10^{-9}		蒸发湖	$1.2 \times 10^{-6} \sim 8.5 \times 10^{-6}$	刘英俊, 1984
洪塘寺温泉 (中国)	181×10^{-9}	张雪等, 2010	人体饮食需要量	$60 \sim 100 \mu\text{g/d}$	
从化温泉 (中国)	59×10^{-9}	周海燕等, 2008	人体正常摄入	$200 \sim 600 \mu\text{g/d}$	秦俊法, 2000
日多温泉 (中国)	2240×10^{-9}	王祝等, 2015	饮用水	$50 \times 10^{-9} \sim 70 \times 10^{-9}$	
茶洛地下水 (中国)	4.55×10^{-9}	于泓等, 2022	有治疗效果	$170 \sim 280 \text{ mg/d}$	Groleau et al., 1987
北山花岗岩地下水 (中国)	11.2×10^{-9}	康明亮等, 2010	环境接触	$< 2 \text{ mg/L}$	杨师, 2000
海水	0.194×10^{-6}		牧草	$0.05 \times 10^{-6} \sim 0.15 \times 10^{-6}$	刘英俊, 1984
河水	$(0.023 \pm 0.011) \times 10^{-6}$	刘英俊, 1984	毛桦树皮及叶子	$60 \times 10^{-6} \sim 74 \times 10^{-6}$	刘英俊, 1984
Selenga塞伦加河 (俄罗斯)	3.4×10^{-9}		谷类、豌豆、菜豆	低	
Upper Angara上安加拉河	1.09×10^{-9}		蛋类、奶类	含量丰富	
Barguzin巴尔古津河	1.77×10^{-9}	Gaillardet et al., 2014	肉类、鱼类、土豆、蔬菜	含量平均	秦俊法, 2000
Mackenzie马更些河 (加拿大)	4.6×10^{-9}		饮料	较高	
Indin River (加拿大)	0.91×10^{-9}		叶菜类、根菜类、水果	较高	杨师, 2000
Upper Yukon育空河 (加拿大)	0.64×10^{-9}		甲基卡锂矿植物根系	4.24×10^{-6}	高娟琴等, 2019

续表 1

介质	Li元素 平均浓度	资料来源	介质	Li元素 平均浓度	资料来源
Skeena斯基纳河（加拿大）	0.35×10^{-9}	Gaillardet et al., 2014	甲基卡锂矿植物茎叶	3.42×10^{-6}	高娟琴等, 2019
Fraser River弗雷泽河（加拿大）	1.05×10^{-9}		野菊花	$(18.35\pm0.86)\times10^{-6}$	李增禧等, 2013 a, b, c, d
Columbia River哥伦比亚河	1.46×10^{-9}		金银花	$(12.01\pm2.61)\times10^{-6}$	
Amazon 亚马逊河	0.91×10^{-9}		连翘	$(24.6\pm3.25)\times10^{-6}$	
Solimoes索利默伊斯河	1.02×10^{-9}		羌活	4.00×10^{-6}	
Madeira马代拉河	1.18×10^{-9}		邹花细辛	3.60×10^{-6}	
Trompetas特龙佩塔斯河	0.41×10^{-9}		防风	2.75×10^{-6}	
Orinoco奥里诺科河	0.32×10^{-9}		茶叶	$0.08\times10^{-6}\sim0.45\times10^{-6}$	
Caroni卡罗尼河	0.16×10^{-9}		全球平均植物	0.2×10^{-6}	Pickett et al., 1992

下水环境质量构成威胁,需要在充分调查水环境污染现状的基础上,全面评价锂资源开发对水环境的影响。

就伟晶岩型锂矿而言,2016年以来,笔者团队以川西甲基卡超大型锂矿为例,将污染源、环境、生态和人体健康作为一个系统加以整体考量(于扬等,2019),通过连续6年的持续动态调查评价,研究结果表明,伟晶岩型锂资源开发区域地表水Cu、Zn、As、Pb含量均符合《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)的Ⅰ类水标准,水质洁净安全(高娟琴等,2019)。朱丽等(2021)对黏土型锂资源绿色浸出工艺的研究表明,硫酸铁浸出工艺具有反应残渣酸性弱和环境污染风险低的特点,但因该类锂资源主要赋存于蒙皂石族矿物或伊利石的晶格中,故浸出所用强酸溶液作为浸出剂对黏土型锂资源的提取产生的环境效应尤其值得关注。盐湖卤水中除Li之外还存在大量的镁、钾、钠、硼等元素,因此在Li的开发利用过程中需要对杂质离子加以分离提纯,特别是针对高镁锂比的卤水型锂资源的开发利用,需要用到溶剂萃取、煅烧浸取等工艺,有研究表明这两种方法能耗高、产生的盐酸腐蚀性大、存在高酸反萃以及溶剂损失、环境污染严重,分析表明,膜分离以及离子交换与吸附等工艺在盐湖卤水提锂方面更有发展前景,但膜分离法耗水量大,而离子交换与吸附法也需要用到较多的吸附溶剂(苏慧等,2019),因此针对卤水型锂资源清洁、高效的开发利用以及水环境效应的评估目前仍有一些关键问题亟待解决。

4.2 锂的土壤-植物效应

锂资源开发导致的土壤环境质量的演变是关系到区域土壤可持续利用和矿业可持续发展的重

要课题,而查明土壤质量现状、评估生态安全效应及其与植物等环境介质条件变化的相互关系是锂资源高效合理开发管理的基础。从国内外研究进展来看,风险评价已成为环境可持续发展重要决策的技术支撑。笔者团队以伟晶岩型锂资源富集区(川西甲基卡和九龙地区)土壤为切入点,系统研究锂资源开发对土壤环境的影响并评估其生态安全,研究结果表明:已开采矿区和未开采区域土壤中Cd、Zn、As、Pb、Cr等重金属元素含量均低于土壤环境质量标准的一级标准限值,甲基卡锂矿各个区域植物中的有害元素的浓度均未超过标准限值(《中国饲料卫生标准》GB 13078—2017),对土壤和植物的生态风险和健康风险评价结果均表明,锂辉石资源的开发不会对土壤-植物系统造成明显的污染,但对尾砂的处理需要重视(于沅等,2019,2021)。在锂辉石资源开发对水、土环境影响评价方面,笔者团队从定性描述向定量模型发展,优化了大型资源基地环境评价指标体系,开展了甲基卡三位一体综合调查,连续六年证实高水平的锂矿资源开发对区域环境的影响是有限、可控、未造成环境污染的,对锂资源安全开发、区域环境可持续发展具有理论意义和实际应用价值(于扬等,2019)。锂的土壤-植物效应除上述锂资源开发的影响外,人为影响如施肥等,也会对植物体产生环境影响。Li是生物体所必须的,有研究表明,同时施用有机肥和石膏,单种草木樨0~60 cm土层内Li总量增加最明显,其中生物改良措施,尤其是单种草木樨结合施用有机肥和石膏,能明显促进各土层内Li的积累(阿依夏木·沙吾尔等,2010)。

4.3 锂矿山生产过程对生态环境的影响

关于锂矿山生产过程对生态环境的影响方面

的研究不多。笔者团队以川西甲基卡超大型锂矿为例,对甲基卡矿区及外围的资源现状及潜力、地质环境影响、资源可利用性及开发利用现状、技术经济条件进行了系统调研与分析(于扬等, 2019; 王登红等, 2021)。在此基础上,对含锂辉石岩脉本身的环境污染性进行了系统性风险评估(表 2),结果表明,甲基卡矿区内的岩脉本身污染性元素含量低,锂辉石开采过程中不会引起污染,但要注意预防选矿过程中人为因素导致污染性元素超标,关注选矿过程的三废排放和尾矿的处理和储存。此外,笔者基于 AI 技术,创新开展了川西甲基卡大型锂资源基地系统化、定量化“三位一体”综合调查评价,首次揭示了锂矿开采的环境问题和影响范围,指出锂矿开采过程对生态环境的扰动是安全、可控的,保障了大型资源基地的生态安全(于扬等, 2019)。

5 锂的生物健康效应

5.1 锂对生物体代谢功能的影响及锂的医疗作用

微量元素 Li 分布于生物机体的整个水相中,不会因代谢而被破坏,其对生物体代谢功能的影响主要有三个方面:一是影响甲状腺素的合成和释放, Li 元素会通过影响甲状腺素的分泌导致甲状腺功能低下,从而引起甲状旁腺功能亢进,二是影响人体内电解质的平衡和糖代谢,三是通过细胞内第二信使系统、中枢神经系统、置换或替代钠、钾,影响细胞内、外钠、钾平衡而发挥生物效应(朱荣林, 1988; 呼文亮, 2006a; 战景明等, 2008)。自 1949 年以来,许多临床研究表明,锂对治疗精神疾病、行为障碍、癫痫、经前期紧张、抑郁综合症和控制暴力犯的发作有效。从医疗方面的研究成果可以看出, Li 元素的医疗用途在于:低剂量的锂具有有益生物学作用,可调节某些内分泌功能,在癌症、血液病、糖尿病、骨髓移植、皮肤病等医学分支中的应用日

渐增多。同时,锂作为抗病毒剂、抗真菌剂、抗炎剂在其他疾病也有较多应用(Schrauzer et al., 1990),当摄入量足以提高血浆 Li 至 $7\times10^{-6}\sim10\times10^{-6}$ 时,碳酸锂对躁狂抑郁精神病有治疗作用,碳酸锂还可以治疗克山病,急性菌痢、功能性子宫出血、子宫肌瘤合并月经过多等(秦俊法, 2000)。锂盐可用于治疗粒细胞减少症、血小板减少症、再生障碍性贫血,以及放、化疗引起的粒细胞减少症,血小板减少、甲状腺功能亢进、糖尿病、早老性痴呆、溃疡病等(杨师, 2000)。

5.2 生理量的锂对健康有益,是生物体必需的一种超微量营养元素

Li 是生物体必需微量元素(朱荣林, 1988),其与生物体健康密切相关,生理量的 Li 对动、植物和人体有益。人体对锂的饮食需要量为 60~100 $\mu\text{g}/\text{d}$,典型的日摄入量为 200~600 μg 。锂缺乏可严重损害实验动物生殖功能,导致实验动物寿命缩短、生育能力受抑、出生体重降低、生长发育缓慢、行为改变等异常。从 20 世纪 60 年代中期开始,国外开始对锂的生物必须性开展实验研究。70 年代初,许多科学家开展了大量实验研究,证实缺锂会导致动物生育能力受抑、出生体重降低、寿命缩短、酶活性和行为功能改变。Dawson(1991)根据美国德克萨斯州 24 个县的自来水锂含量和尿样锂含量研究了精神病与锂的关系,发现 58% 的精神病患者中绝大多数来自低锂地区($0\sim12\times10^{-9}$),饮水锂含量与精神病诊断呈显著负相关。饮水锂水平与心血管病有关,心血管病发病率高的地区饮水锂含量低,亚利桑那州皮马印第安人冠心病和胃癌发生率低与当地饮水中锂含量相对高有关。80 年代, Bryce-Smith(1992)通过 13 次系统实验发现缺锂对山羊生长、生殖功能和授乳均有显著负面影响,证明山羊终身缺锂显著降低胎儿和出生后的生长。Rossetti et al.(1990)发现锂具有胰岛素样作用,能刺激某些培养细胞的生长,增强免疫响应。锂还可降低注意力分散,防止因孤独而引起的行为改变,降低攻击行为,学习困难的儿童发锂含量显著低于正常儿童,听觉理解力、口语表达、行为及运动型的总评分均与发锂含量呈正相关,某些疾病的患者发锂含量显著低于正常健康人,心脏病患者、学习能力低者、在押暴力犯体锂摄入不足(Schrauzer et al., 1990)。

表 2 岩脉本身污染性元素综合污染指数评价结果

Table 2 Evaluation result of integration pollution index of polluting element in dike

	Cr/ 10^{-6}	Cd/ 10^{-6}	Pb/ 10^{-6}	As/ 10^{-6}
平均值	18.65	3.34	32.22	6.09
管制值	1000	3	700	120
单污染指数	0.02	1.11	0.05	0.05
综合污染指数及污染水平	0.82 清洁			

20 世纪 90 年代,大量实验证实低锂饲料喂养的大鼠条件性回避行为明显受抑制,缺锂动物攻击能力降低、生物节律改变。饲料缺锂严重影响动物心脏锂含量(Pickett et al., 1992)。流行病学调查显示,饮用水中锂含量与精神病住院率、自杀、强奸等暴力犯罪发生率和毒品犯罪率呈显著负相关,饮水中不含锂或含少量锂地区,杀人、自杀、抢劫、偷盗、强奸犯罪率显著高于锂含量较高(70×10^{-9} ~ 170×10^{-9})地区,高锂区自杀率平均比低锂区或中锂区(12×10^{-9} ~ 60×10^{-9})低 30%~50%。公共水源锂化可作为降低暴力犯罪、自杀和吸服毒品的一种简单、安全和经济的手段(Schrauzer et al., 1990)。毒品犯营养性锂补充实验研究表明,锂具有改善和稳定情绪的作用(Schrauzer et al., 1994)。治疗剂量的碳酸锂(300 mg/d)曾被用于控制囚犯的暴怒发作以及滥用毒品者的管理中。这些结果说明生物体内锂缺乏对生殖能力、寿命、行为功能等产生负面影响,锂对人体具有益或必须功能。根据动物缺锂研究表明,日摄入量低于 25 $\mu\text{g}/\text{d}$ 将对生物体产生不利影响(Nielsen, 1998)。

5.3 生物体内锂过剩会引起一定的副作用甚至毒性反应

锂对生物体健康的影响是多方面的。人体通过空气、水和食物摄取锂,因而环境中的锂含量直接影响到人体的健康状况。饮水中锂与地质环境有关,通过空气摄入的锂相对较少。人对锂的环境(空气、水和饮食)接触量一般低于 2×10^{-6} ,通过矿泉水、矿物质补充等食物的摄入不会超过环境接触。人类对锂的摄入量与饮食习惯和水源有关,含锂最丰富的食物是蛋类和奶类,肉类、鱼类、土豆和蔬菜有平均含量的锂,饮料中的锂含量也较高,所有谷类、豌豆、菜豆中锂含量最低。有研究表明,锂的日允许摄入量(ADI)为 $0.31\times 10^{-6}/\text{d}$ 。人体实验结果与动物毒性实验研究表明,23 mg 可以作为 ADI 的估计值(秦俊法, 2000)。具有治疗效果的锂剂量为 170~280 mg/d,超过背景值 100 倍以上的治疗剂量上限时将对人体产生毒性作用(Groleau et al., 1987)。在中毒量摄入时,锂可影响许多代谢途径和组织器官。国内主要以碳酸锂治疗精神病症,但也会产生副作用。如恶心、呕吐、肌肉细颤、头晕、嗜睡及无力等,如用量过大,可致惊厥,甚至昏

迷死亡;对心和肾也有一定损害,并可有蓄积中毒、脱水等症状(北京同仁医院血液组, 1982)。

锂对人体的危害可分为局部和全身两个方面。局部危害主要是对皮肤和黏膜的直接腐蚀和强刺激作用,出现斑丘疹、瘙痒性皮炎、牛皮癣等症状;全身危害主要表现为对神经系统、心血管系统、泌尿系统、胃肠道、肌肉、皮肤等的影响。急性锂中毒以消化道、神经系统症状为主(呼文亮, 2006b)。职业性锂及其化合物的健康影响主要以局部刺激作用为主,其次为经呼吸道进入人体后引起的神经系统、肾脏、甲状腺等慢性损伤,最终导致慢性锂中毒。职业性接触锂人群的健康损害逐渐引起人们的关注。但是,目前我国尚未建立职业性锂及其化合物健康损伤诊断标准,难以实现职业性锂接触人员的健康监护(邓世荣, 2000)。

5.4 植物对锂的吸收和挥发作用

植物波谱特性显示,碱金属元素锂含量差别较大,在影像异常内,红柳中锂含量为 7.0×10^{-6} ~ 9.8×10^{-6} 。而在影像异常外,锂含量只有 0.11×10^{-6} 。同样,骆驼刺中的锂含量也明显有这种规律。影像异常内外锂含量的明显差异,对植物的生理功能可能有一定影响,低浓度时,可能是植物生存所必需的元素或者是与植物生存无关的被动吸收。但在高浓度时,有时对植物就有毒害作用(王津义, 1993)。

6 结 论

Li 在不同地质环境中的分布特征及生态、环境与生物健康效应研究属于交叉性、复杂性科学范畴。在高质量发展的新要求下,全方位多维度的锂资源评价不断挑战科研工作者的应对能力。本文通过对不同类型岩石、土壤、水、植物、动物等介质中 Li 的环境调查,粗浅地分析了不同地质环境中锂的分布状态及其对生态环境、生物体的影响。研究表明,伟晶岩型锂资源开发对生态环境的影响整体安全可控。生理量的锂对健康有益,但生物体内锂过剩会引起一定的副作用甚至毒性反应。随着科学理论方法研究的深入和分析测试技术的不断改进,人们对 Li 的认识将逐步加深,从而革新更多新技术新方法,从客观上推动对锂资源合理开发利用的不断进步,同时对锂与生态、环境和生物体健康的关系会有更全面的了解。未来, Li 的作用机理

及其与地质地球化学背景、水-土-气-生界面循环、环境控制因素的相互作用还有待于开展更为深入的研究。

References

- Ayeshamu Shahur, Jia Hongtao, Minawal Nur Aihemaiti, Bai Dengsha Maimaiti Aili. 2010. Research on content distribution and changing characteristics of lithium and rubidium in the meadow saline soil during improvement process[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 47(4): 765–769 (in Chinese with English abstract).
- Beddows D C S, Donovan R J, Harrison R M, Heal M R, Kinnersley R P, King M D, Nicholson D H, Thompson K C. 2004. Correlations in the chemical composition of rural background atmospheric aerosol in the UK determined in real time using time-of-flight mass spectrometry[J]. Journal of Environmental Monitoring, 6(2): 124–133.
- Blood Group of Beijing Tongren Hospital. 1982. The effect of lithium carbonate on hematopoietic tissue[J]. Medical Research Communication, (12): 18–19, 4 (in Chinese).
- Bruland K W, Middag R, Lohan M C. 2014. Controls of Trace Metals in Seawater[C]//Treatise on Geochemistry. Elsevier, 19–51.
- Bryce-Smith D. 1992. Lithium in Biology and Medicine[M]. Wiley-VCH, Weinheim, 307–308.
- Cai Wenjing, Chang Chunping, Song Shuai, Li Jing, Zhang Fang, Li Fadong. 2013. Spatial distribution and sources of dissolved trace metals in surface water of Dezhou irrigation district[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(3): 754–761 (in Chinese with English abstract).
- Chen Qingyun, Xian Su, Huang Ruiheng, Qin Yingfen, Wei Mei'e, He Yuzhong. 1995. Zinc, selenium, lithium, vanadium and germanium concentrations change in hairs in patients with hyperthyroidism[J]. Guangdong Trace Elements Science, (6): 34–37 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaojing, Qi Jianhua, Liu Ning, Zhang Xiangyu, Shen Hengqing, Liu Mingxu. 2014. Concentration distribution of metal elements in atmospheric aerosol under different weather conditions in Qingdao coastal region[J]. Environmental Science, 35(10): 3651–3662 (in Chinese with English abstract).
- Chen Youhe, Young W. 2008. The effects of lithium on the central nervous and blood systems (1)[J]. Chinese Prescription Drugs, (6): 57–59 (in Chinese).
- Dawson E T. 1991. The relationship of tap water and physiological levels of lithium to mental hospital admission and homicide in Texas[J]. Lithium in Biology and Medicine, (1991): 171–187.
- Deng Shirong. 2000. Trace element li and health of human body[J]. Guangdong Trace Elements Science, (11): 12–14 (in Chinese with English abstract).
- Deocampo D M, Jones B F. 2014. Geochemistry of Saline Lakes[C]//Treatise on Geochemistry. Elsevier, 437–469.
- Du Chenchang, Liu Enfeng, Yang Xiangdong, Wu Yanhong, Xue Bin. 2012. Characteristics of enrichment and evaluation of anthropogenic pollution of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 24(1): 59–66 (in Chinese with English abstract).
- Gaillardet J, Viers J, Dupré B. 2014. Trace Elements in River Waters[C]//Treatise on Geochemistry. Elsevier, 195–235.
- Gao Juanqin, Yu Yang, Wang Denghong, Liu Lijun, Dai Hongzhang, Guo Weiming. 2019. Distribution characteristics and implication of rare metal elements in surface water of the Jiajika mine in western Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1331–1341 (in Chinese with English abstract).
- Groleau G, Barish R, Tso E, Whye D, Browne B. 1987. Lithium intoxication: Manifestations and management[J]. The American Journal of Emergency Medicine, 5(6): 527–532.
- Han Jilong. 2018. Hydrochemical of Brines and Their Geological Significances from Southern Qinghai, China [D]. Xining: University of Chinese Academy of Sciences (Chinese Academy of Sciences Qinghai Salt Lake Research Institute), 1–135(in Chinese with English abstract).
- He Jun, Zhou Liting, Li Na, Liu Te, Zheng Dongchun, Qu Xiaofeng, Huang Jian, Ye Lin. 2012. Determination of 18 trace elements in natural mineral water of Changbai Mountain by ICP-MS[J]. Journal of Jilin University (Medicine Edition), 38(6): 1223–1226 (in Chinese with English abstract).
- Hu Wenliang. 2006a. The health effects of trace element lithium (a)[J]. Guangdong Trace Elements Science, (6): 36(in Chinese).
- Hu Wenliang. 2006b. The health effects of trace element lithium (b)[J]. Guangdong Trace Elements Science, (6): 43(in Chinese).
- Huang Runqian. 1999. The effects of tide and rotation on the mass exchange process of binary stars [J]. Research in Astronomy and Astrophysics (2): 171–177(in Chinese with English abstract).
- Jean P J, Marie L C, Gérard M, Jacques E. B. 1980. Lidar measurements of atmospheric lithium[J]. Geophysical Research Letters, 7(11): 995–998.
- Ji Yutong, Cao Shengkui, Cao Guangchao, Li Huafei. 2021. Hydrochemical characteristics of river water and groundwater in the Shaliu river basin of Qinghai Lake in Summer[J]. Journal of Qinghai Normal University(Natural Science), 37(2): 63–75 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Chao, Yan Wenming, He Xiangyu, Wang Xiaolin, Song Yongfeng, Wu Bin, Tian Fen, Liu Tianyang. 2023. Distribution characteristics and source analysis of trace elements in plateau rivers under variable hydrological conditions[J]. Water Resources and Power, 41(1): 55–58, 5 (in Chinese with English abstract).
- Kang Mingliang, Chen Fanrong, Wu Shijun, Zhang Rong, Yang Yongqiang, Wang Li'an. 2010. Se species and concentration-controlling study in Beishan mountain granite ground water[J]. Radiation Protection, 30(6): 327–334 (in Chinese with English abstract).

- Li Lei, Gao Jing, Li Haichang, Lin Ye, Zhou Yibing, Liu Liya. 2016. Determination of 22 elements in atmospheric PM_{2.5} by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 33(6): 620–623 (in Chinese with English abstract).
- Li Zengxi, Pan Weijian, Tan Yongji, Lao Zhihua, Huang Liyi, Xiao Yongbing. 2013a. TCM trace element data (1)[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 20(2): 55–70 (in Chinese with English abstract).
- Li Zengxi, Pan Weijian, Tan Yongji, Lao Zhihua, Huang Liyi, Xiao Yongbing. 2013b. TCM trace element data (2)[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 20(3): 42–70 (in Chinese with English abstract).
- Li Zengxi, Pan Weijian, Tan Yongji, Lao Zhihua, Huang Liyi, Xiao Yongbing. 2013c. TCM Trace Element Data (3)[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 20(4): 55–62 (in Chinese with English abstract).
- Li Zengxi, Pan Weijian, Tan Yongji, Lao Zhihua, Huang Liyi, Xiao Yongbing. 2013d. TCM trace element data (4)[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 20(5): 35–62 (in Chinese with English abstract).
- Lin Bixia, Xi Su, Xia Ning, Liu Hong, Huang Ruiheng, Zhang Guifu, He Yuzhong, Lin Wenye, Luo Jianhui, Huang Lijuan. 1991. Preliminary exploration of the relationship between serum and hair copper, zinc, selenium, chromium, vanadium, lithium, strontium, germanium, and hyperthyroidism[J]. *Guangxi Medical Journal*, (1): 4–9 (in Chinese).
- Lin Lin, Wang Yilin. 2019. Comprehensive study on Tianchi water resources in Changbai Mountain[J]. *Jilin Geology*, 38(1): 60–66, 101 (in Chinese with English abstract).
- Liu X M, Rudnick R L, McDonough W F, Cummings M L. 2013. Influence of chemical weathering on the composition of the continental crust: Insights from Li and Nd isotopes in bauxite profiles developed on Columbia River Basalts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 115: 73–91.
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaoling, Wang Henian, Chu Tongqing, Zhang Jingrong. 1984. *Element Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1–281 (in Chinese).
- Lu Min, Zhang Weiguo, Shi Yuxin, Yu Lizhong, Zheng Xiangmin. 2003. Vertical variations of metals and nutrients in sediments from northern Taihu Lake and the Influencing factors[J]. *Journal of Lake Sciences*, (3): 213–220 (in Chinese with English abstract).
- Manaka T, Araoka D, Yoshimura T, Hossain H M Z, Nishio Y, Suzuki A, Kawahata H. 2017. Downstream and seasonal changes of lithium isotope ratios in the Ganges–brahmaputra river system[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(8): 3003–3015.
- Neal C, Robson A J. 2000. A summary of river water quality data collected within the Land–Ocean Interaction Study: Core data for eastern UK rivers draining to the North Sea[J]. *Science of the total environment*, 251: 585–665.
- Nielsen F H. 1998. Ultratrace elements in nutrition: Current knowledge and speculation[J]. *The Journal of Trace Elements in Experimental Medicine: The Official Publication of the International Society for Trace Element Research in Humans*, 11(2–3): 251–274.
- Pickett E E, O'Dell B L. 1992. Evidence for dietary essentiality of lithium in the rat[J]. *Biological Trace Element Research*, 34: 299–319.
- Qin Junfa. 2000. Biological essentiality of lithium and its health effects in humans[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, (3): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Rossetti L, Giaccari A, Klein–Robbenhaar E, Vogel L R. 1990. Insulinomimetic properties of trace elements and characterization of their in vivo mode of action[J]. *Diabetes*, 39(10): 1243–1250.
- Schlesinger W H, Klein E M, Wang Z, Vengosh A. 2021. Global biogeochemical cycle of lithium[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 35(8): e2021GB006999.
- Schrauzer G N, Shrestha K P. 1990. Lithium in drinking water and the incidences of crimes, suicides, and arrests related to drug addictions[J]. *Biological trace element research*, 25: 105–113.
- Schrauzer G N, Shrestha K P, Flores–Arce M F. 1992. Lithium in scalp hair of adults, students, and violent criminals[J]. *Biological Trace Element Research*, 34(2): 161–176.
- Schrauzer G N, de Vroey E. 1994. Effects of nutritional lithium supplementation on mood: A placebo–controlled study with former drug users[J]. *Biological trace element research*, 40: 89–101.
- Seitz H M, Brey G P, Zipfel J, Ott U, Weyer S, Durali S, Weinbruch S. 2007. Lithium isotope composition of ordinary and carbonaceous chondrites, and differentiated planetary bodies: Bulk solar system and solar reservoirs[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3): 582–596.
- Sharma C M, Kang S, Sillanpää M, Li Q, Zhang Q, Huang J, Tripathi L, Sharma S, Paudyal R. 2015. Mercury and selected trace elements from a remote (Gosainkunda) and anurban (Phewa) lake waters of Nepal[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 226: 1–10.
- Shen Xiaowei. 2017. Characteristics of Some Hot Springs in Northern Hebei and Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–72(in Chinese with English abstract).
- Stoffynegli P, Mackenzie F T. 1984. Mass balance of dissolved lithium in the oceans[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(4): 859–872.
- Su Hui, Zhu Zhaowu, Wang Lina, Qi Tao. 2019. Advances and prospects of extracting and recovering lithium from salt lake brines[J]. *Materials Reports*, 33(13): 2119–2126 (in Chinese with English abstract).
- Teng F Z, McDonough W F, Rudnick R L, Dalpé C, Tomascak P B, Chappell B W, Gao S. 2004. Lithium isotopic composition and concentration of the upper continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4167–4178.
- Wallerstein G, Sneden C. 1982. AK giant with an unusually high abundance of lithium–HD 112127[J]. *The Astrophysical Journal*, 255: 577–584.
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Chen Zhenghui, Li Dexian, Qu Wenjun, Deng Maochun,

- Fu Xiaofang, Sun Yan, Zheng Guodong. 2013. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources[J]. *Geology in China*, 40(2): 361–370 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Liu Lijun, Liu Xinxing, Zhao Zhi, He Hanhan. 2016. Main types and research trends of energy metallic resources in China[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 21–28 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Liu Lijun, Hou Jianglong, Dai Hongzhang, Yu Yang, Dai Jingjing, Tian Shihong. 2017. A preliminary review of the application of “five levels+basement” model for Jiajika style rare metal deosits[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Liu Shanbao, Yu Yang, Wang Chenghui, Sun Yan, Dai Hongzhang, Li Jiankang, Dai Jingjing, Wang Yuxian, Zhao Ting, Ma Shengchao, Liu Lijun. 2019. Exploration progress and development suggestion for the large-scale mining base of strategic critical mineral resources in western Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1444–1453 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 2020. Exploring the development path of China's three rare minerals in the era of global strategic emerging resources[J]. *Scientific and Cultural Popularization of Natural Resources*, (1): 4–11 (in Chinese).
- Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Deng Maochun, Zhao Ting, Liu Lijun. 2020. Research and exploration progress on lithium deposits in China[J]. *China Geology*, 3(1): 137–152.
- Wang Lijun, Zhang Chaosheng, Zhang Shen, Chen Nengjian, Yang Liu. 1998. Geochemical characteristics of rare earth elements in the Zhujiang river in Guangzhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, (5): 71–80 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lixiong, Yang Tongzai, Jiang Tao. 2006. Separation and stable isotopic measurement of lithium in atmosphere aerosol sample[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, (S1): 105–108 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinyi. 1993. Primary application of plant spectral characteristics and its trace-element analysis for remote sensing interpretation of oil and gas [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, (4): 34–37, 7–66 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qilian, Liu Congqiang, Zhao Zhiqi, Chetelat B, Ding Hu. 2008. Lithium isotopic composition of the dissolved and suspended loads of the Yangtze River, China[J]. *Advances in Earth Science*, (9): 952–958 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q L, Chetelat B, Zhao Z Q, Ding H, Li S L, Wang B L, Li J, Liu X L. 2015. Behavior of lithium isotopes in the Changjiang River system: Sources effects and response to weathering and erosion[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 151: 117–132.
- Wang Shifang, Li Zaijun. 2010. Ionic liquid as solvent for preconcentration of trace lithium in hair and its determination by flame atomic absorption spectrometry[J]. *Journal of Clothing Research*, 9(6): 695–700 (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 Zhu, Li Mingli, Shao Bei, Zhuoma Quxi, Jiang Zhenzhen, Liu Gaoling, Duoqi. 2015. Determination of 11 major and minor elements in geothermal water of Riduo hotspring in Tibet by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 34(3): 302–307 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhuo, Huang Ranxiao, Wu Datian, Xu Fengming, Sun Wei, Zhang Dehui, Zhao Yuandong. 2023. The basic characteristics and development potential evaluation of salt lake brine-type lithium deposits[J]. *Geology in China*, 50(1): 102–117 (in Chinese with English abstract).
- Wu B, Zhao D Y, Jia H Y, Zhang Y, Zhang X X, Cheng S P. 2009. Preliminary risk assessment of trace metal pollution in surface water from Yangtze River in Nanjing section, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 82(4): 405–409.
- Wu Fengchang, Meng Wei, Song Yonghui, Liu Zhengtao, Jin Xiangcan, Zheng Binghui, Wang Yeyao, Wang Shengrui, Jiang Xia, Lu Shaoyong, Chu Zhaosheng, Chen Yanqing, Wang Chao, Hua Zulin, Wang Peifang, Yu Zhiqiang, Fu Jiamo. 2008. Research progress in lake water quality criteria in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, (12): 2385–2393 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jiong, Wu Qixin, An Yanling, Gao Shilin, Ke Xinhui, Zhou Jinxiong, Qin Li. 2023. Influence of urbanization on trace elements in natural rivers—A case study of Chishui river basin[J]. *Earth and Environment*, 51(1): 56–66 (in Chinese with English abstract).
- Xi Xiaohuan, Li Min. 2013. Reviews of the development of the exploration geochemistry during the Eleventh Five-Year Period[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 161–169 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Yao, Li Xiao. 2016. Analysis of hydro-chemical features, genetic and value of Mingxiang hotspring[J]. *Pearl River*, 37(3): 90–94 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Yingkai, Qi Haiping, Wang Yunhui, Jin Lin. 1994. Lithium isotope composition of brine, sediments and source water in Da Qaidam lake, Qinghai, China[J]. *Geochimica*, (4): 329, 338 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Darun. 1992. The cosmological and stellar lithium abundance problem[J]. *Progress in Astronomy*, (2): 91–102 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhaoxi. 1987. A new method for recovering lithium from spodumene[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, (3): 48(in Chinese).
- Yan Hongliang, Shi Jianrong. 2018. The mystery of the birth of lithium in the extremely lithium rich giant star, which is known to have the highest abundance of lithium, has been discovered[J]. *Physics*,

- 47(12): 788–791 (in Chinese).
- Yang Yunong. 1986. Lithium resources, production and application abroad[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, (6): 36–39, 18 (in Chinese).
- Yang Shi. 2000. Lithium and human health[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, (4): 10(in Chinese).
- Ye Shixian, Chen Ji, Lin Min. 2009. A Study on the medical and health effects of Jintang Bay seawater hot springs [J] *Straits Science*, (7): 59–63(in Chinese).
- Yoon J. 2010. Lithium as a silicate weathering proxy: Problems and perspectives[J]. *Aquatic geochemistry*, 16: 189–206.
- Yu Feng, Wang Denghong, Yu Yang, Liu Lijun, Dai Hongzhang. 2019. Ecological risk assessment of heavy metals in the soil of the Jiajika lithium deposit[J]. *Environmental Science & Technology*, 42(S1): 232–240 (in Chinese with English abstract).
- Yu Feng, Wang Wei, Yu Yang, Wang Denghong, Liu Shanbao, Gao Juanqin, Lü Bingting, Liu Lijun. 2021. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils from Jiulong Li–Be mining area, western Sichuan Province, China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 40(3): 408–424 (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 Yang, Wang Denghong, Yu Feng, Wang Wei, Liu Lijun, Gao Juanqin, Hao Xuefeng. 2019. Study on the index system of green investigation and environmental evaluation for the Jiajika large lithium mineral resource base, western Sichuan, China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38(5): 534–544 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yang, Wang Wei, Wang Denghong, Gao Juanqin, Liu Shanbao, Yuan Linping, Yu Feng, Zhang Sai. 2021. Hydrochemical prospecting method and its application in Green Investigation of large resource bases: A case study of surface hydrochemical prospecting in the Jiulong area of western Sichuan[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 40(2): 227–238 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yongwei, Huang Yanyun, Wu Ming, Yao Daoguang, He Yuzhong, Lin Wenye, Luo Jianhui, Huang Lijuan, Lin Kui. 1995. The content variation of Co, Li in the hair, serum and bone marrow of aplastic anemia[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, (6): 41–44 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaohua, Zeng Xueping. 1995. The formation of lithium in groundwater and its relationship with human health[J]. *Jiangxi Geological Science and Technology*, (4): 189–190 (in Chinese).
- Zhan Jingming, Ma Yuefeng, Gu Xiaona, Liu Zhanqi. 2008. Research progress on the health damage effects of lithium and its compounds[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, (6): 374–377 (in Chinese).
- Zhang B, Qi F Y, Gao X Z, Li X L, Shang Y T, Kong Z Y, Jia L Q, Meng J, Guo H, Fang F K, Liu Y B, Jiang X, Chai H, Liu Z, Ye X T, Wang G D. 2022. Geological characteristics, metallogenic regularity, and research progress of lithium deposits in China[J]. *China Geology*, 5(4): 734–767.
- Zhang Fei, Jin Zhangdong. 2022. Decryption: Changes in Li Isotopes in hydrological dominant rivers and seawater[J]. *Journal of Earth Environment*, 13(3): 354–356 (in Chinese).
- Zhang Hongfeng, Zhou Hongwei, Cheng Yanfang, Xie Jin, Pan Xinhong, Peng Rongfei. 2017. Determination of 26 elements in atmospheric fine particulate matter by ultrasound assisted extraction and inductively coupled plasma–mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 27(7): 926–930 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoyu. 2021. Complexes of Li/Na/K in Geo–fluids: A Molecular Dynamics Study[D]. Nanjing: Nanjing University, 1–90(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xue, Zhou Xun, Li Zai Guang, Wang Ying, Xu Tingwu, Guo Xiaojuan. 2010. Hydrochemical and isotopic characteristics of the Hongtangsi hot spring in fengning county of Hebei Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 37(5): 123–127 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yaxin, Zhang Mingtao, Zhu Bingqiu, Zhu Lixin. 1988. Alkaline metal elements of the Rehai geothermal field in Yunnan Province[J]. *Journal of Natural Resources*, (1): 16–27 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Haiyan, Zhou Xun, Liu Chunhui, Yu Lan, Li Juan, Liang Yongguo. 2008. Hydro–chemical and isotopic characteristics of Conghua hot mineral springs in Guangdong[J]. *Journal of Natural Resources*, (4): 705–712 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaolong. 2010. Geothermal resources of Wenquan in Wushan county and exploitation prospect[J]. *Gansu Geology*, 19(3): 55–59 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Li. 2021. Study on Mineralogical Characteristics and Green Leaching Technology of Clay–type Lithium Resources [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 1–75(in Chinese with English abstract).
- Zhu Ronglin. 1988. Lithium and human health[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 1(2): 26–29 (in Chinese).
- Zhu Xueliang. 2007. NLTE Effects of Li in Late–type Stellar Atmosphere[D]. Jinan: Shandong Normal University, 1–50(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 阿依夏木·沙吾尔, 贾宏涛, 米娜瓦尔·努尔艾合买提, 白灯莎·买买提艾力. 2010. 草甸盐土改良过程中锂和铷分布和变化特征研究[J]. *新疆农业科学*, 47(4): 765–769.
- 北京同仁医院血液组. 1982. 碳酸锂对造血组织的作用[J]. *医学研究通讯*, (12): 18–19, 4.
- 蔡文静, 常春平, 宋帅, 李静, 张芳, 李发东. 2013. 德州灌区地表水中

- 溶解态痕量金属的空间分布及来源研究[J]. 环境科学学报, 33(3): 754-761.
- 陈青云, 洗苏, 黄瑞衡, 秦映芬, 韦美娥, 何聿忠. 1995. 甲状腺机能亢进症头发锌、硒、钒、锂、锆5种微量元素的动态变化[J]. 广东微量元素科学, (6): 34-37.
- 陈晓静, 祁建华, 刘宁, 等. 2014. 青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究[J]. 环境科学, 35(10): 3651-3662.
- 陈有和, Young W. 2008. 锂对中枢神经和血液系统的作用(一)[J]. 中国处方药, (6): 57-59.
- 邓世荣. 2000. 微量元素锂和人体健康[J]. 广东微量元素科学, (11): 12-14.
- 杜臣昌, 刘恩峰, 羊向东, 吴艳宏, 薛滨. 2012. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价[J]. 湖泊科学, 24(1): 59-66.
- 高娟琴, 于扬, 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 郭唯明. 2019. 川西甲基卡稀有金属矿田地表中稀有金属元素分布特征及意义[J]. 地质学报, 93(6): 1331-1341.
- 韩继龙. 2018. 青海南部含盐盆地卤水水化学及其地质意义研究[D]. 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 1-135.
- 贺军, 周丽婷, 李娜, 刘特, 郑东春, 曲笑锋, 黄鉴, 叶琳. 2012. ICP-MS法测定长白山天然矿泉水中18种微量元素的含量[J]. 吉林大学学报(医学版), 38(6): 1223-1226.
- 呼文亮. 2006a. 微量元素锂的健康效应(a)[J]. 广东微量元素科学, (6): 36.
- 呼文亮. 2006b. 微量元素锂的健康效应(b)[J]. 广东微量元素科学, (6): 43.
- 黄润乾. 1999. 潮汐效应、系统自转效应对双星物质交换过程的影响[J]. 天体物理学报, (2): 171-177.
- 季雨桐, 曹生奎, 曹广超, 李华非. 2021. 青海湖沙柳河流域夏季河水和地下水水化学特征[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 37(2): 63-75.
- 蒋超, 燕文明, 何翔宇, 王小林, 宋勇锋, 吴斌, 田玢, 刘天杨. 2023. 变化水文条件下高原河流微量元素的分布及溯源[J]. 水电能源科学, 41(1): 55-58+5.
- 康明亮, 陈繁荣, 吴世军, 张荣, 杨永强, 王立安. 2010. Se在北山花岗岩地下水中的化学形态及浓度控制分析[J]. 辐射防护, 30(6): 327-334.
- 李磊, 高婧, 李海畅, 林野, 周貽兵, 刘利亚. 2016. 电感耦合等离子体质谱法测定大气PM_{2.5}中22种元素的方法[J]. 环境与职业医学, 33(6): 620-623.
- 李增禧, 潘伟健, 谭永基, 劳志华, 黄丽仪, 肖永兵. 2013a. 中药微量元素数据(1)[J]. 广东微量元素科学, 20(2): 55-70.
- 李增禧, 潘伟健, 谭永基, 劳志华, 黄丽仪, 肖永兵. 2013b. 中药微量元素数据(2)[J]. 广东微量元素科学, 20(3): 42-70.
- 李增禧, 潘伟健, 谭永基, 劳志华, 黄丽仪, 肖永兵. 2013c. 中药微量元素数据(3)[J]. 广东微量元素科学, 20(4): 50-62.
- 李增禧, 潘伟健, 谭永基, 劳志华, 黄丽仪, 肖永兵. 2013d. 中药微量元素数据(4)[J]. 广东微量元素科学, 20(5): 35-62.
- 林碧霞, 洗苏, 夏宁, 刘红, 黄瑞衡, 张桂福, 何聿忠, 林文业, 罗建慧, 黄丽娟. 1991. 血清及头发铜、锌、硒、铬、钒、锂、锶、锆与甲状腺功能亢进症关系的初步探索[J]. 广西医学, (1): 4-9.
- 林琳, 王屹林. 2019. 长白山天池水资源综合研究[J]. 吉林地质, 38(1): 60-66, 101.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1-548.
- 陆敏, 张卫国, 师育新, 俞立中, 郑祥民. 2003. 太湖北部沉积物金属和营养元素的垂向变化及其影响因素[J]. 湖泊科学, (3): 213-220.
- 秦俊法. 2000. 锂的生物必需性及人体健康效应[J]. 广东微量元素科学, (3): 1-16.
- 申晓伟. 2017. 河北和北京北部部分温泉特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-72.
- 苏慧, 朱兆武, 王丽娜, 齐涛. 2019. 从盐湖卤水中提取与回收锂的技术进展及展望[J]. 材料导报, 33(13): 2119-2126.
- 王成辉, 王登红, 孙艳等. 2022. 华南重点矿集区稀有和稀土矿产调查研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 1-332.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊, 邓茂春, 付小方, 孙艳, 郑国栋. 2013. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. 中国地质, 40(2): 361-370.
- 王登红, 刘丽君, 刘新星, 赵芝, 何哈哈. 2016. 我国能源金属矿产的主要类型及发展趋势探讨[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 21-28.
- 王登红, 刘丽君, 侯江龙, 代鸿章, 于扬, 代晶晶, 田世洪. 2017. 初论甲基卡式稀有金属矿床“五层楼+地下室”勘查模型[J]. 地学前缘, 24(5): 1-7.
- 王登红, 刘善宝, 于扬, 王成辉, 孙艳, 代鸿章, 李建康, 代晶晶, 王裕先, 赵汀, 马圣钊, 刘丽君. 2019. 川西大型战略性新兴产业矿产基地勘查进展及其开发利用研究[J]. 地质学报, 93(6): 1444-1453.
- 王登红. 2020. 面向全球战略新兴资源时代 探寻中国三稀矿产发展之路[J]. 国土资源科普与文化, (1): 4-11.
- 王登红, 代鸿章, 于扬等. 2021. 大型锂资源基地调查评价的理论、方法与实践——以川西甲基卡超大型锂矿为例[M]. 北京: 科学出版社, 1-458.
- 王立军, 张朝生, 章申, 陈能坚, 杨柳. 1998. 珠江广州江段水体中稀土元素的地球化学特征[J]. 地理学报, (5): 71-80.
- 王丽雄, 杨通在, 姜涛. 2006. 大气气溶胶中锂的化学分离与同位素比的质谱检测[J]. 分析化学, (S1): 105-108.
- 王津义. 1993. 植物波谱特性及其微量元素分析在油气遥感解译中的初步应用[J]. 国土资源遥感, (4): 34-37, 7-66.
- 汪齐连, 刘丛强, 赵志琦, B. Chetelat, 丁虎. 2008. 长江流域河水和悬浮物的锂同位素地球化学研究[J]. 地球科学进展, (9): 952-958.
- 王仕芳, 李在均. 2010. 离子液体预富集-火焰原子吸收法测定头发中痕量锂[J]. 江南大学学报(自然科学版), 9(6): 695-700.
- 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.
- 王祝, 李明礼, 邵蓓, 卓玛曲西, 姜贞贞, 刘高令, 多吉. 2015. 电感耦合等离子体发射光谱法测定西藏日多温泉地热水中11种主微量元素[J]. 岩矿测试, 34(3): 302-307.
- 王卓, 黄冉笑, 吴大天, 许逢明, 孙巍, 张德会, 赵院冬. 2023. 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, 50(1): 102-117.

- 吴丰昌, 孟伟, 宋永会, 刘征涛, 金相灿, 郑丙辉, 王业耀, 王圣瑞, 姜霞, 卢少勇, 储昭升, 陈艳卿, 王超, 华祖林, 王沛芳, 于志强, 傅家谟. 2008. 中国湖泊水环境基准的研究进展[J]. 环境科学学报, 28(12): 2385–2393.
- 吴炯, 吴起鑫, 安艳玲, 高世林, 柯鑫辉, 周金雄, 秦立. 2023. 城市化对自然河流微量元素的影响研究——以赤水河流域为例[J]. 地球与环境, 51(1): 56–66.
- 徐肇锡. 1987. 从锂辉石回收锂的新方法[J]. 无机盐工业, (3): 48.
- 奚小环, 李敏. 2013. 现代地质工作重要发展领域: “十一五”期间勘查地球化学评述[J]. 地学前缘, 20(3): 161–169.
- 肖尧, 李晓. 2016. 明香温泉水化学特征、地质成因及价值研究[J]. 人民珠江, 37(3): 90–94.
- 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, (4): 329–338.
- 熊大闰. 1992. 关于宇宙锂丰度问题[J]. 天文学进展, (2): 91–102.
- 闫宏亮, 施建荣. 2018. 发现人类已知锂丰度最高的巨星——极富锂巨星中锂元素的诞生之谜[J]. 物理, 47(12): 788–791.
- 杨师. 2000. 锂与人体健康[J]. 金属世界, (4): 10.
- 杨雨浓. 1986. 国外锂资源、生产及应用[J]. 湖南有色金属, (6): 36–39+18.
- 叶实现, 陈础, 林敏. 2009. 金汤湾海水温泉医疗保健作用研究[J]. 海峡科学, (7): 59–63.
- 于泓, 王登红, 于扬, 刘丽君, 代鸿章. 2019. 四川甲基卡锂矿区土壤重金属生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 42(S1): 232–240.
- 于泓, 王伟, 于扬, 王登红, 刘善宝, 高娟琴, 吕秉廷, 刘丽君. 2021. 川西九龙地区锂矿区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试, 40(3): 408–424.
- 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.
- 于扬, 王登红, 于泓, 王伟, 刘丽君, 高娟琴, 郝雪峰. 2019. 川西甲基卡大型锂资源基地绿色调查及环境评价指标体系的建立[J]. 岩矿测试, 38(5): 534–544.
- 于扬, 王伟, 王登红, 高娟琴, 刘善宝, 袁藿平, 于泓, 张塞. 2021. 水化学找矿法及其在大型资源基地绿色调查中的应用——以川西九龙地区地表水化学找矿为例[J]. 岩矿测试, 40(2): 227–238.
- 余永卫, 黄彦云, 吴铭, 姚道光, 何聿忠, 林文业, 罗建慧, 黄丽娟, 林葵. 1995. 再障头发、血清和骨髓组织钴、锂元素含量的变化[J]. 广东微量元素科学, (6): 41–44.
- 曾昭华, 曾雪萍. 1995. 地下水中锂的形成及其与人群健康的关系[J]. 江西地质科技, (4): 189–190.
- 战景明, 马跃峰, 古晓娜, 刘占旗. 2008. 锂及其化合物的健康损伤效应研究进展[J]. 国外医学(卫生学分册), (6): 374–377.
- 张飞, 金章东. 2022. 解密: 水文主导河流和海水 Li 同位素变化[J]. 地球环境学报, 13(3): 354–356.
- 张宏峰, 周洪伟, 程焰芳, 谢进, 潘心红, 彭荣飞. 2017. 超声辅助提取-电感耦合等离子体质谱法测定 PM_{2.5} 中 26 种元素[J]. 中国卫生检验杂志, 27(7): 926–930.
- 张晓宇. 2021. 地质流体中锂、钠、钾配合物的计算模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 1–90.
- 张雪, 周训, 李再光, 王莹, 许庭武, 郭小娟. 2010. 河北丰宁县洪汤寺温泉的水化学与同位素特征[J]. 水文地质工程地质, 37(5): 123–127.
- 郑亚新, 章铭陶, 朱炳球, 朱立新. 1988. 云南热海热田中的碱金属元素[J]. 自然资源学报, (1): 16–27.
- 周海燕, 周训, 柳春晖, 虞岚, 李娟, 梁永国. 2008. 广东省从化温泉热矿水水化学与同位素特征[J]. 自然资源学报, (4): 705–712.
- 周小龙. 2010. 武山温泉地热资源状况及开发利用前景分析[J]. 甘肃地质, 19(3): 55–59.
- 朱丽. 2021. 黏土型锂资源矿物学特征及绿色浸出工艺研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 1–75.
- 朱荣林. 1988. 锂与人体健康[J]. 生物科学信息, 1(2): 26–29.
- 朱学亮. 2007. 晚型恒星大气中锂元素非局部热动平衡效应的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 1–50.