

环境中锂的分析技术与生态健康效应:进展与展望

刘费炆^{1,2}, 杨学志^{1*}, 张海燕¹, 傅建捷^{1,2,3}, 刘倩^{2,3}, 江桂斌^{1,2,3}

(1. 国科大杭州高等研究院 环境学院 浙江省新污染物环境与健康重点实验室, 浙江 杭州 310024; 2. 中国科学院生态环境研究中心 环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100190)

摘要: 碳中和进程推动了锂资源开发和锂电池产业的快速扩张, 锂在开采、材料制备、使用和回收处置过程中的环境释放及健康风险日益受到关注。锂污染具有环境介质分布广和来源识别困难等特征, 传统总量分析已难以满足污染识别与风险评价需求。该文围绕环境与生物体系中锂的分析与效应研究, 系统综述前处理技术与电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 在复杂基质中痕量锂高精度定量分析方面的应用, 分析原位成像、单颗粒分析和锂同位素技术在颗粒态材料识别、迁移过程解析和污染溯源中的作用, 并进一步讨论锂的生态毒性、食物链传递和人体健康风险。未来应加强锂元素标准化监测、过程示踪、同位素数据库建设和综合风险评价, 为锂污染管控及锂电池产业绿色发展提供支撑。

关键词: 锂; 分析技术; 锂同位素; 环境效应; 健康风险

中图分类号: O614. 111; O611. 7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(XXXX)XX-0001-07

Analytical Techniques and Eco-Health Effects of Lithium in the Environment: Progress and Perspectives

LIU Fei-yang^{1,2}, YANG Xue-zhi^{1*}, ZHANG Hai-yan¹, FU Jian-jie^{1,2,3}, LIU Qian^{2,3}, JIANG Gui-bin^{1,2,3}

(1. Zhejiang Key Laboratory of Environment and Health of New Pollutants, School of Environment, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Lithium pollution is widely distributed across environmental media, and its sources are difficult to trace. Therefore, conventional total-concentration analysis can no longer fully meet the needs of pollution identification and risk assessment. This paper focuses on the analytical methods and effects of lithium in environmental and biological systems. It systematically reviews the application of pretreatment techniques and inductively coupled plasma mass spectrometry in the high-precision quantitative analysis of trace lithium in complex matrices; analyzes the roles of in situ imaging, single-particle analysis, and lithium isotope techniques in particulate material identification, migration process elucidation, and pollution source tracing; and discusses the ecotoxicity, food-chain transfer, and human health risks of lithium. Future studies should strengthen standardized lithium monitoring, process tracing, lithium isotope database construction, and integrated risk assessment to support lithium pollution control and the green development of the lithium-ion battery industry.

Key words: lithium; analytical technology; lithium isotopes; environmental effects; health risks

《巴黎协定》提出将全球平均气温较工业化前水平升高控制在2℃之内, 并努力控制在1.5℃之内。在这一背景下, 能源结构调整、新能源汽车推广和规模化储能发展成为低碳转型的重要方向^[1]。在此背景下, 锂离子电池因能量密度高、循环性能好和应用场景广, 已成为交通电气化和新型储能系统中

收稿日期: 2026-08-01; 修回日期: 2026-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (22576046, 22322602, 22193052); 国家重点研发计划项目 (2024YFA1210901); 国科大杭州高等研究院自主部署项目 (2024HIAS-V001, 2023HIAS-Y017); 杭州市重点科研项目 (2025SZZD1B28)

* 通讯作者: 杨学志, 博士, 副研究员, 研究方向: 新能源与环境污染, E-mail: yangxuezhizhi@ucas.ac.cn

的关键组成部分。国际能源署(IEA)数据显示,2025年全球电动汽车销量超过2 000万辆,约占全球新车销量的1/4,预计2026年将进一步增至2 300万辆^[2]。美国地质调查局(USGS)数据显示,2025年全球锂终端用途中电池占比已达约88%^[3]。锂已由传统工业原料逐渐转变为碳中和进程中的关键资源。随着锂需求的快速增长,锂在资源开发、材料制备、电池制造、使用、回收和处置等环节中的环境释放问题也逐渐受到关注^[4-5]。

与传统金属污染物相比,环境中锂的分析和识别面临更复杂的技术问题。一方面,锂可存在于水体、土壤、沉积物、大气颗粒物、生物样品和锂电池材料等多种介质中,不同介质的基质组成和浓度水平差异较大,样品前处理和质量控制难以采用统一流程^[6];另一方面,环境中的锂既包括溶解态锂离子(Li^+),也包括含锂颗粒、电池材料残片或基质结合态锂,仅依赖总量分析难以区分其赋存形态和污染来源^[7-8]。对于生物体系而言, Li^+ 半径小、背景干扰大,选择性识别、跨膜转运观察、亚细胞定位和定量成像均存在一定难度^[9-10]。此外,钠、钾等共存碱金属以及高盐、有机质等复杂基质还可能影响电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定和锂同位素分析的准确性。

针对上述问题,近年来锂的环境分析与生物成像研究在多个方面取得进展,包括复杂样品前处理与痕量定量、溶解态和颗粒态锂区分、元素空间分布表征、生物体系中 Li^+ 可视化检测,以及基于锂同位素的污染来源解析等^[11]。这些技术进展为认识锂在环境介质和生物体系中的分布、迁移、转化和效应提供了重要支撑,但在复杂基质适用性、形态识别准确性、成像定量能力等方面仍有待进一步完善^[12-13]。该文围绕环境与生物体系中锂的分析与效应研究,系统综述了多介质样品前处理与高精度定量分析,原位、空间分布与可视化分析技术,锂同位素溯源等技术进展,并进一步讨论了锂的生态毒性、食物链传递和人体健康风险,以期在碳中和背景下锂污染识别、来源解析、风险评估和全过程管控提供科学支撑。

1 环境与生物体系中锂的分析技术进展

1.1 多介质样品前处理与高精度定量分析

环境与生物样品中锂的准确测定是污染识别、暴露评估和风险评价的前提。由于锂天然丰度低、环境中的浓度范围大,且易受钠、钾等共存碱金属及高盐、有机质等复杂基质影响,因此从样品保存、前处理到仪器测定和质量控制,都需要针对不同介质进行优化^[14-16]。不同介质中锂的赋存形态和基质组成差别较大,水体中的锂多以溶解态 Li^+ 存在,一般经酸化保存、过滤和适当稀释后测定;土壤、沉积物、大气颗粒物以及植物、动物样品则需通过微波消解释放基质结合态锂^[6, 15]。已有研究比较了硝酸、王水、反王水、硝酸-双氧水、硝酸-氢氟酸和反王水-氢氟酸等消解体系,以及赶酸温度、酸浓度等条件对元素回收率的影响,结果表明在120~170℃范围内,赶酸温度对目标元素回收率的影响不显著;其中,170℃为最适赶酸温度,在该条件下的赶酸时间缩短至104 min,且未出现明显的元素损失。鉴于不同样品的基质组成和化学性质存在差异,消解体系仍需根据样品特征进行针对性选择与优化^[6]。

仪器分析方面,原子吸收光谱法(AAS)和电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)方法成熟、操作相对简便,适用于较高浓度样品或常规监测。相比之下,电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)具有更高灵敏度、更宽线性范围和多元素同步分析能力,更适合复杂环境和生物样品中痕量锂的定量测定^[6, 14, 17]。但ICP-MS仍可能受到高盐、有机质及共存离子等基质效应影响,因此需要结合空白控制、内标校正、加标回收和标准物质验证等方式提高结果的准确性和可靠性^[6, 15]。对于锂电池材料及其环境残留物,已有研究已经建立了分类前处理方法。多数正极材料可采用王水消解,隔膜采用硝酸消解,钛酸锂(LTO)需王水-氢氟酸体系,石墨和磷酸锰铁锂(LMFP)则需氢氧化钠熔融处理,六氟磷酸锂(LiPF_6)电解液可直接溶解。上述方法进一步用于锂离子电池正极材料(NCM111、LCO和LFP)在污水、土壤、岩石、植物(灌木)和动物(鲫鱼)等复杂基质中的加标回收验证。根据不同正极材料的元素组成,测定的目标元素包括Li、Mn、Co、Ni和Fe,回收率总体为83.6%~115.5%。该范围包含Li的回收率,其中最低值83.6%为灌木基质中LFP所含Li的回收率,最高值115.5%为岩石基质中NCM111所含Mn的回收率。该回收率范围反映的是上述特定材料和基质条件下多种目标元素的总体方

法回收率，并非锂在所有复杂环境介质中的普遍回收率^[18]。对于污染源解析等高精度锂同位素分析，样品测定前还需通过离子交换树脂等方法去除钠、钾、钙等基体元素，以减少基质效应和同位素测定偏差^[19-22]。多介质锂分析已从水样中锂总量测定，逐渐延伸至复杂环境和生物样品的前处理优化、高精度定量及全过程质量控制（表1）。

1.2 原位、空间分布与可视化分析技术

传统总量分析能够获得环境和生物样品中锂的整体浓度，但难以揭示锂在组织、细胞或颗粒材料中的空间分布、迁移路径和局部富集等特征。为解决这一问题，原位、空间分布和可视化分析技术逐渐被用于锂污染研究。激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱法（LA-ICP-MS）可以进行微区剥蚀和多元素同步检测，在样品前处理较少的条件下获取元素二维分布信息，适用于植物组织、动物组织以及锂电池材料中锂及伴生金属的空间成像^[23-24]。文献[23]在磷酸铁锂（LFP）和磷酸锰铁锂（LMFP）暴露大豆的研究中，利用LA-ICP-MS获取锂、铁和锰的空间分布信号，描绘正极颗粒在根和叶中的分布，并结合单颗粒电感耦合等离子体质谱法（sp-ICP-MS）确认LFP/LMFP颗粒可被植物吸收并向地上部迁移（图1）^[23]。与ICP-MS只能提供总量信息相比，这类方法能够进一步反映颗粒态锂材料在植物体内的分布位置和迁移特征。

除LA-ICP-MS外，sp-ICP-MS、单颗粒电感耦合等离子体发射光谱法（sp-ICP-OES）和激光诱导击穿光谱法（LIBS）也可用于颗粒态或固体含锂材料的分析。其中，sp-ICP-MS能够表征粒径、数量浓度和元素组成，适用于评价电池材料残片在生物组织或环境介质中的分布特征和赋存形态^[23]。分类单颗粒电感耦合等离子体发射光谱法已用于锂电池电极材料颗粒的多元素分析，可辅助识别复杂颗粒混合物的成分^[25]。LIBS具有快速、微损、可进行元素面扫描等特点，已用于锂离子电池正极材料中锂分布的定量分析，也适用于固体样品的快速筛查和原位分析^[26]。但这类方法在实际应用中仍受到标准物质适用性不足、定量准确性有限，以及空间分辨率与灵敏度难以兼顾等因素限制。

可视化检测方面，荧光探针可用于观察细胞和生物体系中Li⁺的动态变化，已有研究利用宽场荧光显微技术追踪电池体系中的Li⁺迁移^[27]。DNAzyme分子信标被用于活细胞中Li⁺的选择性成像，并发现双相情感障碍患者来源神经元中Li⁺的累积水平较高^[28]。近年来，基于冠醚识别单元和螺吡喃等荧光团构建的Li⁺荧光探针，已被用于Li⁺的选择性识别、可逆响应及细胞成像（图1）^[28-29]。相关研究进一步将可逆锂敏感荧光探针用于活细胞内Li⁺的动态成像与毒性评价，实现了对Li⁺跨膜转运和亚细胞定位的可视化，并揭示了其相关生物效应^[29]。原位和可视化分析技术有助于从空间分布、赋存形态和迁移过程等方面解析锂的环境行为，但在复杂环境基质中的选择性、稳定性和定量能力仍需提高^[14, 30]。

1.3 锂同位素分析与污染源溯源

锂同位素分析常用于区分自然风化输入与人为污染来源。天然锂由⁶Li和⁷Li两种稳定同位素组成，其同位素组成通常用 $\delta^7\text{Li}$ 表示。由于锂在水-岩作用、黏土矿物形成、蒸发浓缩、工业加工和电池材料制备过程中会发生不同程度的同位素分馏，不同来源的锂具有不同的 $\delta^7\text{Li}$ 特征^[31-35]。因此，结合锂浓度、 $\delta^7\text{Li}$ 、锂/钠比值和伴生元素特征，有助于开展水体、废水和工业产品中的锂来源解析^[5, 36-37]。

多接收器电感耦合等离子体质谱法（MC-ICP-MS）是高精度 $\delta^7\text{Li}$ 测定常用的仪器平台，环境样品中的锂浓度通常较低，而钠、钾、钙等基体元素含量高，容易造成基质效应和同位素偏差。因此，样品测定前需采用阳离子交换树脂进行纯化，实现锂与主要基体元素的有效分离^[38]。单柱快速分离、超痕量进样和新型MC-ICP-MS平台的发展，提升了低浓度环境和生物样品中 $\delta^7\text{Li}$ 测定的可行性，但在实际分析中，样品残留、标准品缺乏等问题仍然可能影响测定结果^[21, 39]。

锂同位素已用于城市水环境中人为来源的识别。Choi等^[5]关于首尔河水、废水和自来水的研究表明，锂浓度和 $\delta^7\text{Li}$ 组成能够揭示人口密集区锂富集及富锂材料释放的影响。Desautly等^[31]利用锂同位素指纹追踪锂离子电池中锂原料来源，为电池供应链认证和全生命周期监管提供了参考。在造纸和纺织印染等传统工业废水研究中， $\delta^7\text{Li}$ 与浓度和排放通量结合也可用于区分工业源与自然背景输入^[36]。总体而言，锂同位素分析不仅可应用于地质风化示踪，也可用于污染源解析、工业排放识别和电池产业链溯源。未来仍需积累不同矿源、工业产品、废水和环境背景的 $\delta^7\text{Li}$ 数据，并结合多元素指纹、空间成像和迁移模型，提升复杂污染体系中锂来源解析的可靠性^[40-41]。

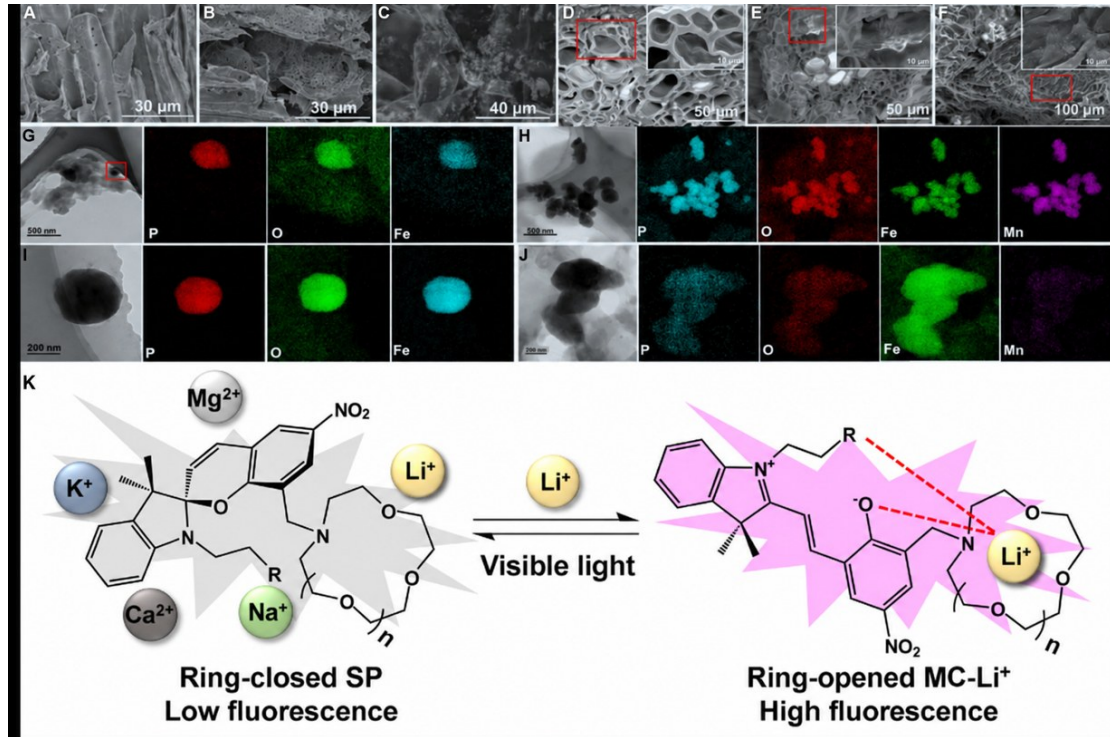


图1 原位、空间分布与可视化技术应用^[23, 29]

Fig. 1 Applications of in situ, spatially resolved, and visualization techniques^[23, 29]

A~J: distributions of LFP and LMFP in soybean plants exposed to contaminated soils for 30 days; K: structures of the SP and MC-Li⁺ of the sensor LSP and reversible binding of Li⁺ (A~J: LFP 和 LMFP 在污染土壤中暴露 30 天的大豆植株中的分布; K: LSP 探针中闭环螺吡喃态 (SP) 和开环部花青-Li⁺配合物 (MC-Li⁺) 的结构, 以及探针对于 Li⁺ 的可逆结合机制)

表1 环境与生物体系中锂的主要分析技术

Table 1 Major analytical techniques for detecting lithium in environmental and biological systems

Technique category	Method	Sample matrix	Main application	Key features	Main limitations	Reference
多介质样品前处理	微波消解、NaOH 熔融、离子交换纯化等	水、土壤、沉积物、生物样品	释放/富集锂, 降低基体干扰	适用范围广, 可优化条件提高回收率	基质差异大, 流程难统一	[16]
总量与痕量定量分析	AAS、ICP-OES、ICP-MS	环境、生物样品	测定锂总量或痕量浓度	方法成熟, ICP-MS 灵敏度高、可多元素分析	易受基体效应影响	[11]
原位空间分布分析	LA-ICP-MS	生物组织、电池材料	获取元素空间分布	前处理少, 可揭示迁移与富集	定量依赖标准物质	[22]
单颗粒分析	sp-ICP-MS、sp-ICP-OES	环境颗粒、生物样品	表征粒径、数量及组成	可区分溶解态与颗粒态	标准化要求高, 复杂体系识别能力有限	[24]
固体样品快速检测与元素成像	LIBS	电池材料及固体样品	快速检测与元素成像	分析快速, 可原位测量	灵敏度和定量性有限	[25]
生物体系可视化检测	荧光探针、DNAzyme 等	活细胞、生物组织	Li ⁺ 识别与动态成像	可用于活体成像与机制研究	选择性及定量能力有待提高	[30]
锂同位素溯源分析	MC-ICP-MS 等	水体、工业产品、地质样品	来源识别与溯源	可区分自然与人为来源	低浓度与基体干扰大	[32]

2 锂的环境效应与健康风险

2.1 生态毒性与食物链传递风险

锂的生态风险不仅来源于溶解态 Li⁺, 也与锂电池材料颗粒、矿业固废浸出液及伴生金属共同暴露密切相关。在陆生生态系统中, 环境相关浓度水平的锂可通过影响离子稳态、根系代谢和抗氧化系统干扰植物生长。以大豆为模型的土壤暴露研究表明, 锂的植物毒性具有明显的浓度和形态依赖性。Shakoor 等^[42] 将大豆在 Li 浓度为 25、50、100、200 mg/kg 的粉壤土中培养 28 天, 结果显示, 25、50 mg/kg 处理对植株生长具有一定促进作用, 而 100、200 mg/kg 处理显著抑制植株生长, 并扰乱 Ca、Mg 等矿质元素稳态及根系代谢过程。对于颗粒态含锂材料, Liu 等^[23] 将大豆在 Li 浓度为 0、10、20、50、

70 mg/kg 的 LFP 或 LMFP 污染土壤中培养 30 天, 发现两类正极材料均可被植物吸收并向地上组织迁移, 同时引发浓度依赖性的生长抑制、细胞结构损伤和代谢响应, 其中 LFP 的植物毒性强于 LMFP。

在水生生态系统中, 锂及锂电池材料释放的组分可能对浮游动物、鱼类和底栖生物产生影响。镍钴锰酸锂三元正极材料 (NCM) 在水环境中具有较强的 Li^+ 释放能力, 镍、钴、锰等过渡金属总体溶出比例较低, 但在酸性、有机质含量较高或渗滤液条件下的释放量会增加, 可能会产生离子态与颗粒态并存的复合毒性^[43]。Duan 等^[44]将大型 暴露于 Li 浓度分别为 8.34、83.44、834.41 $\mu\text{g/L}$ 的水体, 开展 24~96 h 急性暴露和 21 天慢性暴露实验。结果表明, 中、高浓度 Li 可影响其发育、生殖和游泳行为, 并伴随线粒体稳态失衡、氧化应激及自噬过程改变。斑马鱼胚胎暴露实验表明, 锂矿石、尾矿和锂渣等固废浸出液可导致胚胎死亡率升高、心率降低、体长缩短, 并增加畸形发生风险^[45]。

在中国重要锂盐生产区锦江流域, 河水锂浓度由上游的 1.1~3.0 $\mu\text{g/L}$ 升至锂提取区下游的 103.9 $\mu\text{g/L}$; 水葫芦根部平均锂含量由上游的 5.7 mg/kg 升至下游的 22.8 mg/kg (干重), 约增加 4 倍; 鱼类平均锂含量由 80.7 $\mu\text{g/kg}$ 升至 700.5 $\mu\text{g/kg}$ (干重), 接近增加 10 倍, 表明锂提取活动显著增强了水生生物锂暴露, 存在潜在的食物链传递风险^[46]。Thibon 等^[47-48]的研究表明, 锂在不同类群和组织中的积累差异明显, 沿食物链传递时可能呈现生物稀释特征, 而非生物放大特性。未来锂的生态风险评价应在测定总量浓度的基础上, 进一步考虑赋存形态、生物可利用性、伴生金属共同暴露及营养级放大因子 (TMF) / 生物放大因子 (BMF) 等食物链传递指标。

2.2 人体健康与复合污染风险

人体锂暴露主要来自饮用水、食物摄入及受污染环境介质的间接输入。全球水体调查表明, 不同地区饮用水、地下水和地表水中锂浓度差异较大, 部分水体已达到健康关注水平, 但目前国际上仍缺乏统一的饮用水锂的安全限值^[49]。由于锂具有明确的药理作用, 其长期低剂量摄入风险值得关注。临床和流行病学研究显示, 锂暴露可能导致肾脏浓缩功能下降、甲状腺和甲状旁腺功能异常、孕期胎儿发育变化及后代神经发育风险^[50-52]。治疗性暴露通常涉及较高的给药剂量, 且治疗过程中需监测血液锂浓度, 与普通人群经饮水和膳食形成的长期痕量暴露在剂量水平、暴露方式及人群特征等方面存在明显差异。因此, 临床研究结果不能直接等同或外推为普通人群的环境暴露风险。目前, 环境水平锂暴露的健康效应证据仍较有限, 且多来自观察性研究, 未来仍需结合个体暴露水平、共同暴露因素和敏感人群特征开展进一步研究。

锂污染的健康风险通常不是由单一锂暴露导致, 还与伴生元素、工艺添加剂及电池相关污染物的共同暴露相关。以卤水提锂废水为例, 除了锂之外, 其还含有高盐组分及多种主量、微量元素等, 说明资源开发环节可能带来复合风险^[53]。废旧锂离子电池在填埋、破碎、焚烧和非规范回收过程中, 可能通过浸出、颗粒释放和有毒气体排放等途径, 释放锂、镍、钴、锰、电解液组分以及含氟、含磷污染物, 从而增加共同暴露风险^[54-55]。因此, 未来健康风险评价应在单一元素的基础上, 进一步考虑多途径暴露、多污染物共存及敏感人群差异等因素。

3 挑战与展望

碳中和进程加快了锂资源开发和锂电池产业扩张, 也使环境锂研究的关注点从浓度监测逐渐扩展到多介质赋存、形态识别和全生命周期风险。现阶段, 不同介质样品在前处理、质量控制和检测平台上仍缺乏统一规范, 限制了数据之间的比较; 溶解态 Li^+ 、颗粒态电池材料和矿业固废浸出组分在环境中的迁移转化过程仍不清楚; 长期低剂量暴露、食物链传递, 以及锂与伴生金属、含氟有机物之间的复合毒性仍需要更多的证据支撑。

针对锂资源开发及锂电池全生命周期可能产生的环境与健康风险, 应根据产业链不同环节进行差异化管控。在矿山开采和盐湖提锂环节, 应提高废水利用率, 规范尾矿和锂渣的收集与处理, 并根据不同固体废物的浸出特征实行分类管理; 在电池制造、使用和回收环节, 应加强含锂粉尘、生产废水及电解液组分的收集与处置, 建立覆盖电池生产、回收和处理的全流程体系; 对于锂盐生产区、非规范回收点及其周边饮用水源和农田, 应开展水体、土壤和生物样品的协同监测, 并结合锂的赋存形态、伴生污染物及敏感人群暴露特征, 进行风险分级和预警。

环境中锂的分析应与污染溯源、暴露评价和风险管理相关联。将总量测定与分级过滤、单颗粒分析及空间成像相结合,区分溶解态 Li^+ 和颗粒态含锂材料,并识别其局部赋存与迁移特征;锂同位素组成和伴生元素指纹则可用于辨别自然背景、矿业排放、工业废水及电池材料释放等来源。在此基础上,可结合锂的生物可利用性、暴露水平与途径、敏感人群及毒性阈值,对不同区域和暴露情景进行分级风险评价。相关分析结果还可为重点区域筛选、污染源排查、治理效果评估以及环境基准和限值的制定提供依据。

未来研究应围绕精准监测、过程解析和风险管控,建立覆盖水体、土壤、大气颗粒物、生物样品和锂电池材料的标准化分析方法,结合原位成像、单颗粒分析和锂同位素溯源等技术,提升锂污染源识别与迁移过程解析能力。同时,构建不同矿源、工业产品、废水和环境背景的锂浓度及锂同位素组成数据库,并结合多元素指纹、暴露模型和毒性机制研究,完善锂污染风险评价,为重点行业监测、环境限值制定和锂电池全生命周期管理提供科学支撑。

参考文献:

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Key Aspects of the Paris Agreement. [2026-09-07]. <https://unfccc.int/most-requested/key-aspects-of-the-paris-agreement>.
- [2] International Energy Agency (IEA). Executive Summary – Global EV Outlook 2026. [2026-09-07]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026/executive-summary>.
- [3] Geological Survey U.S.. *Mineral Commodity Summaries 2026*. Reston: U.S. Geological Survey, 2026: 222.
- [4] Yang X Z, Wen H N, Lin Y, Zhang H Y, Liu Y, Fu J J, Liu Q, Jiang G B. *Environ. Sci. Technol.*, **2023**, 57 (13): 5103–5106.
- [5] Choi H B, Ryu J S, Shin W J, Vigier N. *Nat. Commun.*, **2019**, 10 (1): 5371.
- [6] Yang X Z, Qi T Y, Wen H N, Liu Y, Liu F Y, Zhang H Y, Fu J J, Liu Q, Jiang G B. *Chin. Sci. Bull.* (杨学志, 齐甜雨, 文昊楠, 刘娅, 刘费炀, 张海燕, 傅建捷, 刘倩, 江桂斌. 科学通报), **2023**, 68 (15): 1959–1970.
- [7] Laborda F, Abad-Álvaro I, Jiménez M S, Bolea E. *Spectrochim. Acta B*, **2023**, 199: 106570.
- [8] Tian X W, Jiang H W, Hu L G, Wang M, Cui W B, Shi J B, Liu G L, Yin Y G, Cai Y, Jiang G B. *TrAC, Trends Anal. Chem.*, **2022**, 157: 116746.
- [9] Javanbakht F, Najafi H, Jalili K, Salami-Kalajahi M. *J. Mater. Chem. A*, **2023**, 11 (48): 26371–26392.
- [10] Zhao D, Zhang W H, Zhang S K, Shen G L. *ChemistrySelect*, **2025**, 10 (24): e01543.
- [11] Doble P A, de Vega R G, Bishop D P, Hare D J, Clases D. *Chem. Rev.*, **2021**, 121 (19): 11769–11822.
- [12] Merviĉ K, Šala M, Theiner S. *TrAC, Trends Anal. Chem.*, **2024**, 172: 117574.
- [13] Pan H J, Feng L X, Lu Y L, Han Y C, Xiong J P, Li H M. *TrAC, Trends Anal. Chem.*, **2022**, 156: 116710.
- [14] Shakoor N, Adeel M, Tariq S, Ishfaq M, Azeem I, Zhou H. *Anal. Chem.*, **2026**, 98 (12): 8662–8681.
- [15] Török A I, Moldovan A, Levei E A, Cadar O, Tănăsela C, Moldovan O T. *Materials*, **2021**, 14 (14): 4002.
- [16] Lombard M A, Brown E E, Saftner D M, Arienzo M M, Fuller-Thomson E, Brown C J, Ayotte J D. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58 (2): 1255–1264.
- [17] Liu X M, Li W S. *Anal. At. Spectrom.*, **2019**, 34 (8): 1708–1717.
- [18] Qi T Y, Yang X Z, Liu Y, Wen H N, Liu F Y, Yue Z Q, Qi Z Y, Zhang H Y, Fu J J, Liu Q, Jiang G B. *Anal. Chim. Acta*, **2024**, 1331: 343334.
- [19] Scott S R, Turner G L, Gartman B N, Anguiano S A, Melby K M, Allen B E, Minton T D, RisenHuber M A, Hobbs K P. *J. Anal. At. Spectrom.*, **2025**, 40 (4): 1098–1105.
- [20] Dong W, Sun G C, Li Z Y, Sun J D, Dai L Q. *J. Anal. At. Spectrom.*, **2026**, 41 (6): 2273–2280.
- [21] Jouini A, Payant L, Vigier N. *J. Anal. At. Spectrom.*, **2026**, 41 (3): 1004–1016.
- [22] Zhu G H, Ma J L, Wei G J, Zhang L. *Front. Chem.*, **2020**, 8: 557489.
- [23] Liu Y C, Yang X Z, Wang W C, Ma W D, Yu H, Long C C, Li G, Wen H N, Liu Q, Jiang G B. *Environ. Sci. Technol.*, **2025**, 59 (27): 14006–14019.
- [24] Harte P, Evertz M, Schwieters T, Diehl M, Winter M, Nowak S. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2019**, 411 (3): 581–589.
- [25] Kröger T N, Wiemers-Meyer S, Harte P, Winter M, Nowak S. *Anal. Chem.*, **2021**, 93 (20): 7532–7539.
- [26] Imashuku S, Taguchi H, Kawamata T, Fujieda S, Kashiwakura S, Suzuki S, Wagatsuma K. *J. Power Sources*, **2018**, 399: 186–191.
- [27] Padilla N A, Rea M T, Foy M, Upadhyay S P, Desrochers K A, Derus T, Knapper K A, Hunter N H, Wood S, Hinton D A, Cavell A C, Masias A G, Goldsmith R H. *ACS Sens.*, **2017**, 2 (7): 903–908.
- [28] McGhee C E, Yang Z, Guo W, Wu Y, Lyu M, DeLong C J, Hong S, Ma Y, McInnis M G, O’Shea K S, Lu Y. *ACS Cent. Sci.*, **2021**, 7 (11): 1809–1820.

- [29] Gong C, Zhang P M, Liu Y, Chen R L, Huang K, Yang W Z, Gao L R, Xu M, Yang X Z, Liu Y, Liu Q, Yan B, Zhao B, Jiang G B. *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 493: 138343.
- [30] Devaraj A, Gu M, Colby R, Yan P, Wang C M, Zheng J M, Xiao J, Genc A, Zhang J G, Belharouak I, Wang D, Amine K, Thevuthasan S. *Nat. Commun.*, **2015**, 6 (1): 8014.
- [31] Desautly A M, Monfort Climent D, Lefebvre G, Cristiano-Tassi A, Peralta D, Perret S, Urban A, Guerrot C. *Nat. Commun.*, **2022**, 13 (1): 4172.
- [32] Zhang F, Dellinger M, Hilton R G, Yu J, Allen M B, Densmore A L, Sun H, Jin Z. *Nat. Commun.*, **2022**, 13 (1): 3359.
- [33] Misra S, Froelich P N. *Science*, **2012**, 335 (6070): 818–823.
- [34] Penniston-Dorland S, Liu X M, Rudnick R L. *Rev. Mineral. Geochem.*, **2017**, 82 (1): 165–217.
- [35] Pogge von Strandmann P A E, Kasemann S A, Wimpenny J B. *Elements*, **2020**, 16 (4): 253–258.
- [36] Guo C Q, Yang X Z, Yu Z C, Zhu G H, Zhang Q, Fu J J, Liu Q, Zhang H Y, Jiang G B. *Environ. Sci. Technol.*, **2026**, 60 (4): 3556–3566.
- [37] Ma X T, Meng Z F, Bellonia M V, Spangenberg J, Harper G, Gratz E, Olivetti E, Arsenault R, Wang Y. *Nat. Rev. Clean Technol.*, **2025**, 1 (1): 75–94.
- [38] Cao C, Li T, Chen T Y, Li G J, Li W, Chen J. *J. Anal. At. Spectrom.*, **2023**, 38 (8): 1602–1610.
- [39] Morcillo D, Winckelmann A, Oelze M, Leonhardt R, Schmidt A, Richter S, Recknagel S, Vogl J, Panne U, Abad C. *J. Anal. At. Spectrom.*, **2025**, 40 (11): 3306–3316.
- [40] Dellinger M, Gaillardet J, Bouchez J, Calmels D, Galy V, Hilton R G, Louvat P, France-Lanord C. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **2014**, 401: 359–372.
- [41] Pistiner J S, Henderson G M. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **2003**, 214 (1–2): 327–339.
- [42] Shakoor N, Adeel M, Ahmad M A, Hussain M, Azeem I, Zain M, Zhou P, Li Y, Xu M, Rui Y. *J. Hazard. Mater.*, **2023**, 441: 129898.
- [43] Liu Y, Wen H N, Chen Y S, Yang X Z, Liu Y, Zhao B, Jiang G B. *Environ. Sci. Technol.*, **2026**, 60 (8): 6589–6599.
- [44] Duan C N, Zhao Y F, Xiao Y Y, Hou Y S, Gong W B, Zhang H Y, Wang Y M, Nie X P. *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 488: 137420.
- [45] Liang J F, Zheng L Q, Zhang Q, Yang J W, Lei B, Yuan F G, Li M Y, Jiang W, Li Y L, Yang X Z, Liu R Z, Zhang H Y, Liu Q, Jiang G B. *Water Res.*, **2026**, 292: 125385.
- [46] Yang X Z, Wen H N, Liu Y, Huang Y, Zhang Q, Wang W C, Zhang H Y, Fu J J, Li G, Liu Q, Jiang G B. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58 (26): 11637–11648.
- [47] Thibon F, Weppe L, Vigier N, Churlaud C, Lacoue-Labarthe T, Metian M, Cherel Y, Bustamante P. *Sci. Total Environ.*, **2021**, 751: 141453.
- [48] Thibon F, Weppe L, Churlaud C, Lacoue-Labarthe T, Gasparini S, Cherel Y, Bustamante P, Vigier N. *Front. Environ. Chem.*, **2023**, 3: 1060651.
- [49] Adeel M, Zain M, Shakoor N, Ahmad M A, Azeem I, Aziz M A, Tulcan R X S, Rathore A, Tahir M, Horton R, Xu M, Rui Y. *NPJ Clean Water*, **2023**, 6 (1): 33.
- [50] McKnight R F, Adida M, Budge K, Stockton S, Goodwin G M, Geddes J R. *Lancet*, **2012**, 379 (9817): 721–728.
- [51] Chan J K N, Solmi M, Correll C U, Man Wong C S, Lo H K Y, Lai F T T, Chang W C. *JAMA Netw. Open*, **2025**, 8 (2): e2458608.
- [52] Chevalier N, Guillou P, Viguié C, Fini J B, Sachs L M, Michel-Caillet C, Mhaouty-Kodja S. *Environ. Int.*, **2024**, 190: 108861.
- [53] Williams G D Z, Vengosh A. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2025**, 12 (2): 151–157.
- [54] Mroziak W, Rajaeifar M A, Heidrich O, Christensen P. *Energy Environ. Sci.*, **2021**, 14 (12): 6099–6121.
- [55] Guelfo J L, Ferguson P L, Beck J, Chernick M, Doria-Manzur A, Faught P W, Flug T, Gray E P, Jayasundara N, Knappe D R U, Joyce A S, Meng P, Shojaei M. *Nat. Commun.*, **2024**, 15 (1): 5548.

(责任编辑：盛文彦)