

西昆仑含锂盐湖卤水蒸发成矿机理初探

陈 倩

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年7月13日; 录用日期: 2026年8月13日; 发布日期: 2026年8月21日

摘 要

西昆仑位于青藏高原北缘, 区内富锂花岗伟晶岩和长英质岩石广泛发育, 深大断裂、封闭山间盆地及高寒干旱气候在空间上耦合, 为盐湖卤水型锂资源形成提供了有利地质条件。本文综合国内外含锂盐湖研究成果, 从区域锂源、水文输运、水化学演化、蒸发结晶分异及锂赋存转化等方面, 系统总结西昆仑含锂盐湖卤水蒸发富集与成矿机制。现有认识表明, 盐湖锂富集并非单纯由水分蒸发控制, 而是源区岩石风化与深循环流体供锂、断裂和水系输导、封闭盆地汇聚、蒸发与冻结浓缩、主要盐类选择性结晶以及晚期母液保存共同作用的结果。不同水化学类型决定卤水的析盐顺序和锂迁移路径: 氯化物型卤水在石盐大量析出后通常表现为Li、K、Mg和B向残余母液富集; 硫酸盐型卤水受石膏、芒硝及复硫酸盐沉淀控制, 锂的富集效率与硫酸根去除程度和固相夹带密切相关; 碳酸盐型卤水则受碱度、pH及碳酸盐矿物沉淀制约。综合区域资料, 可将西昆仑盐湖锂成矿过程概括为“多源供锂 - 构造输导 - 流域汇聚 - 蒸发/冻结分异 - 晚期母液储集”。当前研究仍存在锂源贡献比例、水盐平衡、地下孔隙卤水分布及气候变化响应等方面的不足。未来应加强流域尺度连续监测、多同位素联合示踪、矿物 - 卤水反应模拟和地下卤水调查, 以建立可量化、可检验的区域成矿模式。

关键词

西昆仑, 含锂盐湖, 卤水蒸发, 水化学类型, 锂同位素, 成矿模式

A Preliminary Study on the Evaporative Mineralization Processes and Mechanisms of Lithium-Bearing Salt Lake Brines in the West Kunlun

Qian Chen

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: July 13, 2026; accepted: August 13, 2026; published: August 21, 2026

Abstract

The West Kunlun region is located along the northern margin of the Qinghai-Xizang Plateau, where lithium-rich granitic pegmatites and felsic rocks are widely developed. The spatial coupling of deep-seated faults, closed intermontane basins, and a cold-arid alpine climate provides favorable geological conditions for the formation of lithium resources in salt lake brines. Based on a comprehensive review of studies on lithium-bearing salt lakes in China and elsewhere, this paper systematically summarizes the evaporative enrichment and metallogenic mechanisms of lithium-bearing salt lake brines in the West Kunlun region, with emphasis on regional lithium sources, hydrological transport, hydrochemical evolution, evaporative crystallization and differentiation, and the occurrence and transformation of lithium. Current understanding indicates that lithium enrichment in salt lakes is not controlled solely by water evaporation, but results from the combined effects of lithium supply through weathering of source rocks and deep-circulating fluids, transport through fault systems and drainage networks, accumulation within closed basins, evaporative and cryogenic concentration, selective crystallization of major salts, and preservation of late-stage residual brines. Different hydrochemical types determine the sequence of salt precipitation and the migration pathways of lithium. In chloride-type brines, Li, K, Mg, and B are generally concentrated in the residual mother liquor following extensive halite precipitation. In sulfate-type brines, lithium enrichment is controlled by the precipitation of gypsum, mirabilite, and complex sulfate salts, and its enrichment efficiency is closely related to the extent of sulfate removal and the entrapment of brine or lithium by solid phases. In carbonate-type brines, lithium behavior is primarily constrained by alkalinity, pH, and the precipitation of carbonate minerals. Integrating the available regional data, the metallogenic process of lithium in West Kunlun salt lakes can be summarized as a sequential process of “multi-source lithium supply - tectonic transport - catchment-scale accumulation - evaporation/freezing-induced differentiation - late-stage residual brine storage”. Nevertheless, significant uncertainties remain regarding the relative contributions of different lithium sources, basin-scale water-salt balance, the distribution of subsurface pore brines, and the response of lithium enrichment to climatic change. Future studies should therefore strengthen continuous monitoring at the catchment scale, integrated multi-isotope tracing, mineral-brine reaction modeling, and systematic investigation of subsurface brines, with the aim of establishing a quantitative and testable regional metallogenic model.

Keywords

Western Kunlun, Lithium-Bearing Salt Lake, Brine Evaporation, Hydrochemical Type, Lithium Isotopes, Metallogenic Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锂是新能源产业和高端制造领域的重要关键金属。全球锂资源主要赋存于花岗伟晶岩、盐湖卤水、黏土及地热流体等类型中，其中卤水型锂矿具有资源规模大、组分综合利用潜力高和矿体连续性较好的特点，是世界锂资源供应的重要组成部分[1]-[3]。典型富锂卤水多形成于构造活动强烈、气候干旱、蒸发量大于补给量的封闭盆地，但盆地封闭和强蒸发只是成矿的必要条件之一。若缺少持续锂源、有效输运

通道和稳定储集空间，即使湖水高度矿化，也不一定形成具有资源意义的富锂卤水。

西昆仑－喀喇昆仑地区位于青藏高原北缘，既是我国重要的花岗伟晶岩型锂矿成矿带，也分布苦水湖、甜水海－红山湖等高原盐湖盆地。富锂硬岩矿床与封闭湖盆相邻，使该地区成为认识“固体锂源－水岩作用－流域输运－盐湖汇聚－蒸发浓缩”连续成矿过程的重要区域。近年来，苦水湖水化学与锂同位素、红山湖泉水水文地球化学以及西昆仑伟晶岩型锂矿研究不断深化，为建立区域盐湖锂成矿模式提供了基础[4]-[9]。

已有综述多从盐湖资源、提锂技术或青藏高原整体水化学类型出发，对西昆仑山间盆地中锂源条件、构造输导和蒸发分异之间的关系讨论相对不足。本文以国内外典型含锂盐湖研究为参照，重点总结西昆仑区域地质背景、水化学演化、蒸发结晶和锂迁移机制，评述不同成因观点及其证据边界，并提出后续研究方向。

2. 西昆仑含锂盐湖的区域成矿地质条件

2.1. 构造－盆地格架

西昆仑位于塔里木盆地南缘与青藏高原北部之间，经历原－古特提斯洋演化、陆块拼合、碰撞造山及新生代高原隆升等多阶段构造作用。研究区地质图见(图 1)，这一区域的地层展现出了从元古界到新生界的完整序列，岩性丰富多样，这为锂元素的迁移和富集创造了有利的地质环境。多期构造变形形成近东西向、北西向深大断裂及一系列山间断陷盆地。对卤水型锂矿而言，构造作用主要通过改变盆地地貌、水文通道和储集条件影响成矿：深大断裂可增强地下水深循环和水岩反应，为富锂流体上升提供通道；差异沉降形成相对封闭的汇水中心和沉积空间；细粒沉积物与盐层充填则有利于降低渗漏、保存高矿化度孔隙卤水。

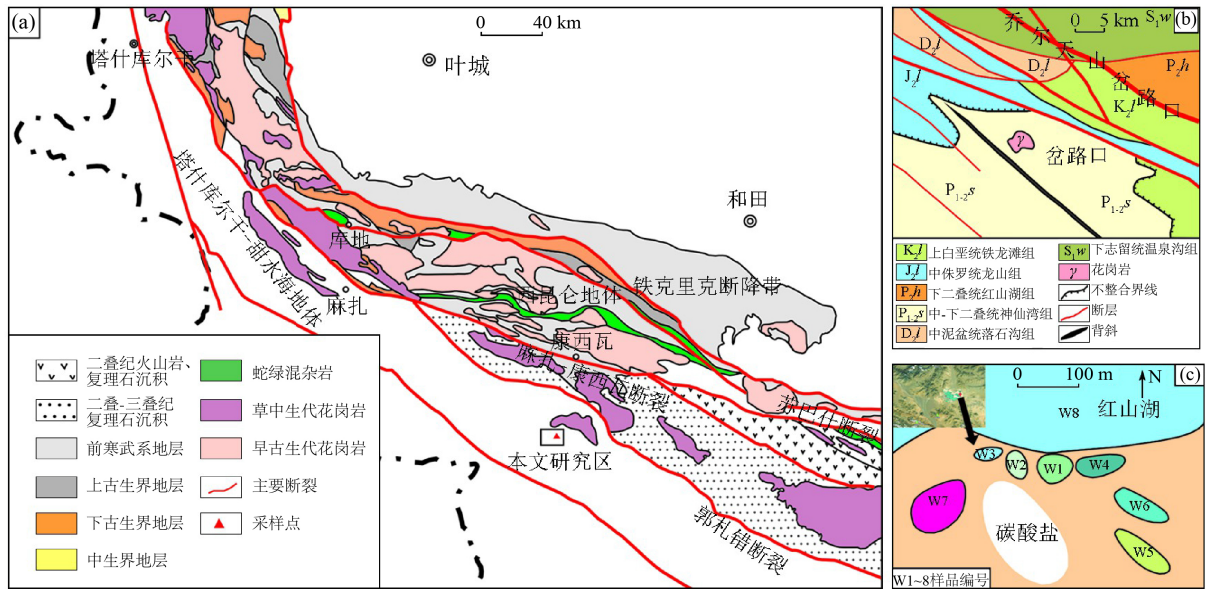


Figure 1. Simplified geological map of the study area (adapted from [6])

图 1. 研究区地质略图(引自[6])

断裂对盐湖成矿具有双重效应。导水断裂可提高源区与湖盆之间的物质交换，使深部流体和风化淋滤水快速输入盆地；但若断裂持续开放并与盆地外低势区连通，也可能造成卤水泄漏。因此，成矿评价不仅应识别断裂规模和方向，还需分析断裂的封闭性、活动期次及其与含水层的水力联系。

2.2. 地层岩性与锂源条件

区域出露元古界-新生界沉积岩、变质岩和多期岩浆岩。三叠系巴颜喀拉山群碎屑岩-浅变质岩系广泛分布,沿构造带发育花岗岩和花岗伟晶岩。大红柳滩及邻区已发现较大规模的伟晶岩型锂矿化,锂辉石、锂云母及富锂长石-云母组合为表生水体提供了潜在锂源[7]-[9]。长英质岩石、伟晶岩风化产物和含锂碎屑沉积物可在降水、融水及地下水作用下释放 Li;深循环水岩反应和地热活动则可提高矿物溶解效率,并携带 Li、B、Rb、Cs 等易迁移组分进入浅部水系。

然而,源岩富锂并不等同于卤水富锂。锂能否从矿物中有效释放,受矿物结构、风化强度、温度、pH、流体停留时间及侵蚀速率控制;释放后的溶解态锂还可能被黏土和次生矿物吸附。因此,区域成矿潜力应以可溶锂通量而非单纯源岩品位衡量,并结合流域面积、岩性比例、地表径流路径和地下水循环条件综合判断。

2.3. 水文-气候条件与卤水保存

西昆仑高海拔地区总体寒冷干燥,太阳辐射强、昼夜温差大并具有明显季节性冻结。夏季蒸发使湖水盐度升高,冬季冰晶排盐又可使溶质进入未冻结卤水,蒸发与冻结可能共同促进年内浓缩。与此同时,冰雪融水和短时强降水可造成季节性稀释,并改变河流、泉水和地下水的补给比例。盐湖富集的关键在于多年尺度上蒸发与冻结排盐是否持续大于补给和外泄,而不是某一季节的瞬时高盐度。

红山湖周缘泉水以 Na-HCO₃ 型低矿化度水为主,主要接受大气降水补给,并在沿断裂和裂隙深循环过程中发生水岩反应;湖水则演化为以 Na 和 Cl 为主的高矿化度水体[6]。苦水湖流域亦表现出补给区水体向湖盆高盐卤水转变的特征[4]-[9]。这种空间分异说明,水体进入封闭湖盆后经历碳酸盐反应、主要盐类沉淀和持续蒸发,水化学控制因素由岩石风化逐步转向蒸发结晶。

3. 国内外含锂盐湖研究进展

3.1. 安第斯高原与北美封闭盆地

南美安第斯高原盐沼是全球卤水型锂矿研究最成熟的地区。Atacama、Hombre Muerto 和 Uyuni 等盆地的研究表明,富锂火山岩和火山碎屑物质风化、地热流体输入、古盐层再溶解及长期蒸发均可能贡献锂。经典矿床模型据此提出封闭盆地、干旱气候、持续构造沉降、火山-地热活动、适宜含水层和较长流体停留时间等有利条件[1][2]。后续研究进一步强调,不同盐沼的补给结构、地下水交换和形成时间差异显著,现代蒸发强度无法单独解释资源品位[10]。

美国内华达封闭盆地研究则侧重富锂流纹岩、凝灰岩、黏土矿物和地下水之间的联系。锂-铍同位素和岩石淋滤资料显示,硅酸盐风化能够持续释放锂,而次生黏土形成会选择性地固定轻锂同位素,使溶液 $\delta^7\text{Li}$ 升高[11][12]。这一认识推动锂同位素由单纯物源指标转变为记录源区、风化强度和水-岩反应过程的综合示踪剂。

3.2. 青藏高原盐湖

青藏高原盐湖研究建立了氯化物型、硫酸盐型和碳酸盐型卤水的基本分类框架,并在成盐序列、硼锂同位素和资源利用方面形成较系统认识[13]-[15]。柴达木盆地研究强调山区径流、深部热水、古盐层再溶解和多期湖泊演化对高镁卤水的共同控制;藏北盐湖研究则显示,地热泉、硅酸盐岩风化和古沉积物在不同盆地中的贡献比例并不相同。即使相邻湖盆处于类似气候条件,其锂源和水文过程也可能存在明显差异,说明盐湖锂成矿具有较强盆地个性。

近年来，多同位素联合示踪成为青藏高原盐湖研究的重要方向。 $\delta^7\text{Li}$ 可反映源区和次生矿物反应， $\delta^{11}\text{B}$ 有助于判断硼来源及水化学演化， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 可区分碳酸盐岩、硅酸盐岩和深部流体端元， δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 则用于约束补给与蒸发。多指标结合能够降低单一同位素的多解性，但其可靠性仍依赖于端元选择、流域通量和矿物反应过程的独立约束。

3.3. 西昆仑地区

西昆仑盐湖研究起步相对较晚。苦水湖水化学与锂同位素研究认为，富锂泉水、伟晶岩型锂矿和长英质岩石均可能参与供锂，断裂裂隙控制富锂流体运移，混合和蒸发作用促进湖盆内 Li 富集[5]-[15]。红山湖资料则表明，泉水主要接受大气降水补给，深循环水岩作用改变其离子组成，湖水在封闭盆地内进一步蒸发演化[6]。

与南美火山盆地相比，西昆仑的突出特征是硬岩型锂矿带与高原盐湖盆地直接毗邻，这为研究固体锂矿风化向卤水型锂资源转化提供了重要实例。但现有工作仍以地表水化学和区域地质调查为主，长期水文监测、地下孔隙卤水、蒸发盐矿物学和多同位素质量平衡资料较少，尚难定量评估不同锂源的贡献。上述典型盐湖的主要锂源类型与富集过程对比见表 1。

Table 1. Major lithium sources and enrichment processes in typical lithium-bearing salt lakes in China and abroad
表 1. 国内外典型含锂盐湖的主要锂源与富集过程

地区	主要锂源	关键富集过程	研究认识
安第斯高原盐沼	富锂火山岩、地热流体、古盐层	长期封闭、极强蒸发、地下水汇聚	强调盆地水盐平衡和多源混合
美国内华达盆地	流纹岩、凝灰岩、地下热水	硅酸盐风化、黏土反应、地下水循环	锂 - 锶同位素约束源与过程
柴达木与藏北盐湖	山区径流、地热泉、硅酸盐岩、古盐层	河流输入、蒸发结晶、多期湖泊演化	相邻湖盆可具有不同成因
西昆仑苦水湖	伟晶岩型锂矿、长英质岩石、富锂泉水	断裂输导、混合、蒸发浓缩	硬岩锂矿带与盐湖直接耦合
甜水海 - 红山湖	围岩水岩作用及潜在深循环流体	泉水补给、湖盆汇聚、盐类分异	需加强同位素和地下卤水研究

4. 卤水水化学类型与蒸发结晶演化

4.1. 水化学类型划分

卤水水化学类型是判断盐类沉积序列和锂赋存状态的基础。通常依据主要阴离子的毫克当量比例，将盐湖卤水划分为氯化物型、硫酸盐型和碳酸盐型，硫酸盐型还可细分为硫酸钠亚型和硫酸镁亚型[15]-[17]。天然水体的类型并非固定不变，而会随碳酸盐沉淀、石膏析出、硫酸盐还原、古盐层溶解及水体混合发生演化。由流域上游至湖盆中心，主控作用通常由岩石风化和混合逐步转为蒸发结晶。

4.2. 氯化物型卤水

氯化物型卤水以 Cl^- 为优势阴离子， Na^+ 通常占主要阳离子。蒸发初期可先发生碳酸盐或钙硫酸盐沉淀，进入石盐饱和阶段后大量 NaCl 析出，使 Li、K、Mg、B 及 Rb、Cs 等高溶解度组分向残余母液富集。继续蒸发可进入钾盐和镁盐阶段，出现钾石盐、光卤石、水氯镁石及不同水合硫酸镁矿物。石盐沉淀通常能够显著提高 Li/Na，但锂并非完全保守，晶间母液、流体包裹体、晶面吸附和微量晶格替代均可能使

其进入固相[18]-[20]。

4.3. 硫酸盐型卤水

硫酸盐型卤水的演化受 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 之间的反应控制。石膏、芒硝、无水芒硝及复硫酸盐沉淀可显著改变 Ca/SO_4 、 Na/SO_4 和 Mg/Li 比值。若硫酸根在早期未充分移除，晚期可能形成复杂钾镁复盐，提高锂在盐晶孔隙和表面中的损失概率。因此，硫酸盐型卤水的锂富集效率不仅取决于蒸发程度，也取决于硫酸盐矿物的结晶路径和固液分离条件。

4.4. 碳酸盐型卤水

碳酸盐型卤水具有较高 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和碱度，常与硅酸盐风化、火山 - 地热活动及 Ca 、 Mg 早期去除有关。蒸发过程中碳酸盐矿物持续沉淀并调节 pH 和碱度。虽然 Li_2CO_3 溶解度相对较低，但天然湖盆中是否形成独立碳酸锂，受 Li 和 CO_3^{2-} 活度、温度、离子强度、成核条件及 Mg 、 B 等组分影响，不能将工业加碱沉锂过程直接等同于自然成矿。上述三类卤水在蒸发过程中的概化成盐序列及锂的响应特征对比见表 2。

4.5. 相平衡与天然蒸发路径

多元水盐体系相图和热力学模型是联系卤水组成与矿物沉积序列的重要工具。稳定相图反映充分平衡条件下的最终组合，介稳相图则更接近自然蒸发中因成核迟滞和动力学限制形成的结晶路径[19]。由于芒硝、无水芒硝、泻利盐、六水泻盐和水氯镁石等水合盐对温度高度敏感，同一卤水在不同季节可形成不同矿物组合。简化相图通常不包含 Ca 、 HCO_3^- 、 Li 和 B 等组分，将天然卤水投影至相图前应结合矿物鉴定、离子活度和饱和指数，避免仅凭离子浓度判定完整成盐序列。

Table 2. Evaporation sequences and lithium responses for brines of different hydrochemical types
表 2. 不同水化学类型卤水的蒸发序列及锂响应

类型	主要水化学特征	概化成盐序列	锂的主要响应
氯化物型	Cl^- 、 Na^+ 占优势	钙盐(视初始组成)→石盐→钾镁盐	石盐阶段 Li/Na 升高，晚期存在固相损失
硫酸盐型	SO_4^{2-} 较高，可分 Na_2SO_4 和 MgSO_4 亚型	石膏/芒硝→复硫酸盐→石盐及钾镁盐	硫酸根去除程度控制后期盐类组合和 Li 保存
碳酸盐型	HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 及碱度较高	碳酸盐→硼酸盐或石盐等	Li 行为受 pH、活度和成核条件控制

5. 锂的来源、迁移与蒸发富集机制

5.1. 多源供锂与流域输运

西昆仑盐湖锂源可概括为表生岩石风化端元、深部流体端元和再循环盐类端元。表生端元包括花岗岩伟晶岩、长英质岩石及含锂碎屑沉积物；深部端元包括地热水、岩浆 - 热液流体和经历深循环水岩作用的地下水；古盐层或同生卤水再溶解则可在较短时间内提高 Na 、 Cl 和 Li 含量。不同端元可通过 Li - B - Sr 同位素、 Cl/Br 、元素组合和水文位置进行识别，但单一指标通常难以唯一判定来源。

溶解态 Li 主要由河流、季节性径流、地下水和泉水从源区输送至湖盆。输运过程中，硅酸盐和碳酸盐风化增加溶质负荷，淡水混合造成稀释，蒸发使 Li/TDS 升高，黏土吸附和次生矿物形成则可使部分 Li

转入固相。断裂既控制深循环泉水出露，也可沟通不同含水层，是连接源区和汇区的重要构造通道。

5.2. 吸附 - 解吸与同位素分馏

黏土矿物、铁锰氧化物和细粒沉积物可通过表面络合、离子交换和结构缺陷固定 Li。吸附强度受矿物种类、Li 浓度、pH、固液比和离子强度控制[20]。在低矿化度水体中，蒙脱石、伊利石等可能固定较多 Li；进入高盐卤水后， Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 竞争吸附位置，高离子强度又改变表面电性，部分 Li 可能重新解吸。因此，吸附 - 解吸是控制锂在水体与沉积物间再分配的动态过程，而非单向富集或损失机制。

锂同位素能够记录矿物 - 水反应。次生矿物通常优先吸收 ^6Li ，使溶液 $\delta^7\text{Li}$ 升高；快速岩石淋滤或部分深部流体可能保持相对较低的 $\delta^7\text{Li}$ 。进入湖盆后，蒸发本身产生的同位素分馏有限，但伴随的黏土吸附、石盐和复盐结晶会改变固液相分配。因而， $\delta^7\text{Li}$ 既受物源控制，也反映水岩作用和盐类沉淀过程，解释时应结合 Li 浓度、元素比值和矿物学证据。

5.3. 蒸发 - 冻结与盐类结晶分异

蒸发和冻结是提高湖盆卤水 Li 浓度的直接物理过程。水分减少或结冰排盐使总溶解固体和离子活度升高，当碳酸盐、钙硫酸盐、硫酸钠和石盐等矿物依次达到饱和后，大量 Ca、Na、 SO_4 和 Cl 从液相移出。Li 盐在早 - 中期阶段通常保持较高溶解度，因而 Li 随 K、Mg 和 B 共同向晚期母液富集。该过程本质上是主要成盐元素结晶与高溶解度微量组分残余富集之间的化学分异。

蒸发浓缩程度并不等同于锂的净富集效率。若盆地存在地下渗漏、淡水持续补给或盐晶大量夹带母液，液相 Li 浓度与系统 Li 总量可能呈不同变化。天然盐层中锂可赋存于晶间孔隙卤水、流体包裹体、晶体表面及少量晶格位置，晚期还可能进入复杂复盐[21][22]。因此，成矿研究需要同时关注终端卤水、盐层孔隙水和固相中的锂，而不能仅依据表层湖水品位评价富集程度。

5.4. 影响锂保存的关键因素

富集后的锂能否形成可保存的卤水矿体，主要受盆地封闭性、含水层结构、盐层孔隙度和淡水 - 卤水界面控制。细粒黏土沉积、盐层胶结和持续构造沉降可形成相对封闭的地下卤水储层；高渗透断裂、强地下径流或频繁洪水补给则可能引起稀释和排泄。现代地表湖水只是盐湖水文系统的一部分，资源主体可能储存在盐壳下部和碎屑含水层孔隙中。成矿模式因此必须同时解释锂的输入、浓缩、地下迁移和长期保存。

需要澄清的是， Mg^{2+} 与 Li^+ 不构成经典同离子关系，镁盐对 Li 行为的影响主要来自水活度、离子缔合、竞争吸附及晚期盐类结晶。高 Mg/Li 比更多反映母液演化程度和工业分离难度，不能直接推导天然条件下 Li 必然沉淀。同样，锂辉石和锂云母属于岩浆 - 变质成因硅酸盐矿物，不应被视为低温盐湖蒸发阶段的沉淀产物。

6. 西昆仑含锂盐湖的成矿模式与主要控制因素

综合区域地质、水文地球化学和国内外盐湖研究，可将西昆仑含锂盐湖概括为“多源供锂 - 构造输导 - 流域汇聚 - 蒸发/冻结分异 - 晚期母液储集”的成矿系统。源区以花岗伟晶岩、长英质岩石及含锂碎屑物为主，深循环流体和古盐层再溶解可能提供附加锂；降水、冰雪融水和地下水淋滤源岩，河流与泉水沿构造 - 地形梯度向山间盆地迁移；进入封闭盆地后，蒸发和冻结提高盐度，主要盐类依次析出，Li 向晚期卤水富集；富锂母液最终储存在地表湖水、盐壳孔隙和碎屑含水层中，并受到淡水补给、盐层溶解、吸附 - 解吸和地下渗漏的持续改造。

该模式强调不同湖盆的成矿差异。若深部流体贡献显著，断裂附近泉水应出现 Li、B、Rb、Cs 等同步异常，并表现出区别于浅层径流的同位素组成；若表生风化占主导，溶解 Li 通量应与富锂岩石分布、流域侵蚀和硅酸盐风化强度相关；若古盐层再溶解重要，则 Cl/Br、Na/Cl 及 Sr 同位素会显示再循环信号。成矿模式中的每一环节均应由独立地质和地球化学证据约束，避免以单一高 Li 浓度替代完整成因论证。

从区域资源评价角度看，西昆仑盐湖锂成矿优势主要包括富锂硬岩源区、构造裂隙发育、封闭山间盆地和强蒸发-冻结环境；限制因素则包括湖盆规模相对较小、水文波动明显、地下卤水分布不清及生态环境脆弱。未来勘查应由地表湖水采样转向流域-盆地-含水层一体化调查，并重点识别地下富锂卤水储层及其更新速率。

7. 主要问题与研究展望

首先，应建立流域尺度的长期水盐平衡。现有研究多以单次或单季采样为主，难以区分蒸发、冻结、降水稀释和地下渗漏的相对贡献。未来需在丰水期、枯水期和冻结期同步监测河流、泉水、湖水和地下水，结合气象、遥感湖面变化和地下水位资料，计算水量与溶解 Li 通量，从而判断锂富集是现代快速过程还是长期地质累积。

其次，应量化不同锂源的贡献。 $\delta^7\text{Li}$ 具有明显过程敏感性，单独使用容易产生多解性。应联合 $\delta^{11}\text{B}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 及 Cl、S 同位素，结合源岩矿物学、流域岩性比例和端元混合模型，区分伟晶岩风化、长英质岩石、深部流体和古盐层再溶解的贡献。

再次，应加强天然成盐序列和地下卤水研究。现有相图多为简化体系，难以完整描述 Ca、Li、B 及有机组分对结晶路径的影响。后续可结合矿物鉴定、热力学模拟和季节性盐壳调查，建立适用于西昆仑低温环境的卤水演化模型。同时，应通过地球物理、钻探和分层水化学测试查明盐壳及碎屑层孔隙卤水的厚度、品位、孔隙度和渗透性。

最后，应将气候变化与生态水文约束纳入资源评价。高原增温、冰川退缩和降水变化可能同时增加流域 Li 输入和湖水稀释，其净效应取决于盆地水量平衡。卤水开发还可能改变淡水-卤水界面、湿地水位和蒸发面积。因此，应建立开发前水文地球化学基线和动态监测体系，将可采资源量、卤水更新速率与生态安全边界统一评价。上述西昆仑含锂盐湖研究中的关键问题与对应建议方向归纳见表 3。

Table 3. Key issues and suggested research directions for lithium-bearing salt lakes in the Western Kunlun Mountains
表 3. 西昆仑含锂盐湖研究的关键问题与建议方向

关键问题	主要不足	建议研究方向
锂源贡献比例	不同端元及矿物反应影响相互叠加	多同位素、源岩矿物学与端元质量平衡
现代水盐平衡	季节性和多年连续资料不足	多季节水文监测、遥感和溶质通量计算
天然成盐路径	简化相图难覆盖 Ca、Li、B 等组分	矿物鉴定、饱和指数及扩展热力学模型
地下卤水资源	盐壳和碎屑含水层资料缺乏	地球物理、钻探、分层取样与储层参数评价
资源环境协调	开发影响和卤水更新速率不清	生态水文基线、动态监测和情景模拟

8. 结论

西昆仑含锂盐湖形成于富锂岩石、深部流体、断裂系统、封闭山间盆地和高寒干旱气候共同作用的区域地质背景。花岗伟晶岩和长英质岩石风化是重要表生锂源，深循环泉水、地热流体和古盐层再溶解可能提供附加组分；断裂和水系控制锂由源区向湖盆输运。

卤水蒸发富集是多阶段水-岩-盐作用的结果。不同水化学类型决定主要盐类析出顺序和锂的分配路径,但其共同规律是碳酸盐、钙硫酸盐、硫酸钠和石盐等先期沉淀,使Li在多数早-中期阶段向晚期母液富集。与此同时,黏土吸附、盐晶孔隙母液、流体包裹体和复杂复盐可造成锂在固液相之间重新分配。

西昆仑盐湖锂成矿可初步概括为“多源供锂-构造输导-流域汇聚-蒸发/冻结分异-晚期母液储集”。该模式强调锂源、输运、浓缩和保存缺一不可,并突出硬岩型锂矿带与高原盐湖相邻的区域特色。现阶段仍需通过长期水盐平衡、多同位素联合示踪、地下孔隙卤水调查和扩展热力学模型,对各环节进行定量检验。

参考文献

- [1] Bradley, D., Munk, L., Jochens, H., *et al.* (2013) A Preliminary Deposit Model for Lithium Brines. U.S. Geological Survey Open-File Report.
- [2] Munk, L.A., Hynek, S.A., Bradley, D.C., Boutt, D., Labay, K. and Jochens, H. (2016) Lithium Brines. In: *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*, Society of Economic Geologists, 339-365. <https://doi.org/10.5382/rev.18.14>
- [3] Liu, C., Lowenstein, T.K., Wang, A., Zheng, C. and Yu, J. (2023) Brine: Genesis and Sustainable Resource Recovery Worldwide. *Annual Review of Environment and Resources*, **48**, 371-394. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112621-094745>
- [4] 李玉龙, 苗卫良, 张西营, 等. 西昆仑地区苦水湖富锂盐湖水化学特征及成盐元素来源[J]. 地球科学, 2021, 46(11): 4161-4174.
- [5] Li, Y., Miao, W., He, M., Li, C., Gu, H. and Zhang, X. (2023) *Ore Geology Reviews*, **155**, Article 105356. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105356>
- [6] 肖睿, 庞守吉, 祝有海, 等. 新疆甜水海地区红山湖泉水化学特征及其意义[J]. 物探与化探, 2023, 47(1): 39-46.
- [7] 洪涛, 胡明曦, 唐俊林, 等. 新疆西昆仑大红柳滩花岗伟晶岩型锂矿叠加改造成矿特征: 来自矿石构造、3D 成像技术与年代学的约束[J]. 岩石学报, 2024, 40(2): 553-570.
- [8] 霍海龙, 陈正乐, 张青, 等. 新疆西昆仑 509 道班西锂矿伟晶岩石英变形特征、温度及其对伟晶岩就位的约束[J]. 地质力学学报, 2024, 30(1): 72-87.
- [9] 蒋炜, 李伟, 杜斌, 等. 新疆西昆仑-喀喇昆仑地区锂多金属成矿带地质特征及资源潜力[J]. 西部探矿工程, 2024, 36(7): 78-81.
- [10] Godfrey, L.V., Chan, L.H., Alonso, R.N., Lowenstein, T.K., McDonough, W.F., Houston, J., *et al.* (2013) The Role of Climate in the Accumulation of Lithium-Rich Brine in the Central Andes. *Applied Geochemistry*, **38**, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.09.002>
- [11] Araoka, D., Kawahata, H., Takagi, T., Watanabe, Y., Nishimura, K. and Nishio, Y. (2014) Lithium and Strontium Isotopic Systematics in Playas in Nevada, USA: Constraints on the Origin of Lithium. *Mineralium Deposita*, **49**, 371-379. <https://doi.org/10.1007/s00126-013-0495-y>
- [12] Benson, T.R., Coble, M.A., Rytuba, J.J. and Mahood, G.A. (2017) Lithium Enrichment in Intracontinental Rhyolite Magmas Leads to Li Deposits in Caldera Basins. *Nature Communications*, **8**, Article No. 270. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00234-y>
- [13] 郑绵平. 青藏高原盐湖资源研究的新进展[J]. 地球学报, 2001, 22(2): 97-102.
- [14] Zhu, R., Wang, S., Srinivasakannan, C., Li, S., Yin, S., Zhang, L., *et al.* (2023) Lithium Extraction from Salt Lake Brines with High Magnesium/Lithium Ratio: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **21**, 1611-1626. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01571-9>
- [15] 张世春, 崔香梅. 氯化物型和硫酸盐型卤水物性参数变化规律研究[J]. 盐湖研究, 2018, 26(1): 48-58.
- [16] 李武, 董亚萍. 西藏盐湖卤水成盐过程自然能的应用[J]. 科技导报, 2017, 35(12): 39-43.
- [17] Gao, Y.F., Wang, Z.H., Zhao, J.M., *et al.* (2024) The Loss Mechanism and Recovery Strategy of Lithium during the Decreasing of Mg^{2+}/Li^{+} Ratio in Large Solar Salt Field. *Minerals Engineering*, **216**, Article 108837. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108837>
- [18] Lin, Y.J., Merli, M., Censi, P., *et al.* (2024) Experimental and Theoretical Constraints on Lithium Isotope Fractionation during Brine Evaporation and Halite Precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **374**, 250-263.

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.03.003>

- [19] 金作美, 周惠南, 王励生. $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 五元体系 35°C 介稳相图研究[J]. 高等学校化学学报, 2001, 22(4): 634-638.
- [20] 赵越, 马万平, 杨洋, 等. 黏土矿物对 Li^+ 的吸附实验研究——对黏土型锂矿成矿启示[J]. 矿物学报, 2022, 42(2): 141-153.
- [21] 李梦玲. 察尔汗盐湖卤水动态变化特征及其对固液转化过程的指示作用[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2023.
- [22] 陈仰, 李欢, 顾升波, 等. 盐湖锂资源现状及提锂技术研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(9): 1659-1670.