

吕翰羿,程怀德,李斌凯,等.重液分选茶卡北山水系沉积物及其对伟晶岩型锂矿床探矿的指示意义[J].盐湖研究,2024,32(6):78-86.
Lü H Y, Cheng H D, Li B K, et al. Heavy-fluid separation of the north caka mountain stream sediment and its significance to search pegmatite lithium ore[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(6): 78-86.
DOI: 10.3724/j.ahy.2024040
CSTR: 32273.14.j.ahy.2024040

重液分选茶卡北山水系沉积物及其对伟晶岩型锂矿床探矿的指示意义

吕翰羿^{1,2,3}, 程怀德^{1,2*}, 李斌凯^{1,2}, 马海州^{1,2}, 李永寿^{1,2}, 韩文华^{1,2}, 王金思^{1,2,3}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;)

摘要:伟晶岩型锂矿是最重要的锂金属来源之一,由于在时间、空间和构造背景方面存在显著的不均一性,该型矿床目前尚无有效的探矿方法。在迁移搬运过程中,水系沉积物保留了蚀源区矿物信息,利用其元素和矿物组成,可在一定程度上还原沉积物物源区的矿物组成特征。分析水系沉积物中含锂重矿物的亏损与富集以及粒径的变化,是伟晶岩型锂矿探矿的有效方法之一。文章以茶卡北山流域的水系沉积物为研究对象,经逐级精细化地重液分选,实现了重、轻质矿物的有效分选。结果表明,河流过程可以对水系沉积物中的锂含量产生较大的影响,无支流时的搬运距离越远,水系沉积物中的锂含量越少,支流混合可以对水系沉积物中的锂含量产生正相关影响。重液分选方法对水系沉积物含锂矿物产生了有效的富集作用,主要富集锂元素的载体为云母类矿物,锂元素含量较未分选前提高3~14倍,且在分选后产生了明显的矿物组成差异。这种变化规律可用于对含锂伟晶岩矿物的指示与追踪,因此水系沉积物的重液分选法是伟晶岩型锂矿床探矿的重要指示方法。

关键词:茶卡北山;伟晶岩型锂矿床;水系沉积物;重液分选实验;地球化学探矿

中图分类号:P736.21

文献标志码:A

文章编号:1008-858X(2024)06-0078-09

锂元素是第二周期 IA 族碱金属元素,在目前已知的所有金属元素中,锂是密度最小、电极电势最低的一种金属元素。虽然锂元素在元素周期表中位于相当靠前的位置,但因为锂原子在恒星核合成过程中多作为中间产物消耗,现存的锂大多形成于宇宙线粒子的天然散裂反应(X 过程)^[1]和超新星爆发过程中形成的放射性铍同位素衰变^[2],因此宇宙中锂元素的丰度相对较低。锂元素在地球系统中的平均含量仅为 1.40 g/t,在地壳中的平均含量为 13.00 g/t^[1],是典型的微量元素。锂元素在军工、核电、新能源、生物医药等多个领域都有着广泛应用。锂元素的生物相容性较好,含锂药物有助于修复生物表皮损伤^[3]。锂电池具备较高的比能量^[4]和较好的运行稳定性^[5]。由于锂资源的分布不均,含锂矿床的找矿工作便成为一项艰巨任务。

水系沉积物在地质学、环境科学和工农业生产等诸多领域的研究中都有着广泛的意义。研究水系沉积物的元素组成,可以提供地表环境下元素富集分散特征的对比基础,提供元素迁移过程的直接证据。运用水系沉积物对区域环境特征及找矿前景区进行成功分析的案例不胜枚举,国内比较有代表性的有中国地质大学(北京)欧阳永棚团队^[6]运用水系沉积物示踪江西省贵溪市重金属污染程度以及中国地质调查局秦丹鹤团队^[7]利用水系沉积物确定青海曲旁浪斜地区铍、金元素的成矿前景区等。但现阶段运用水系沉积物对锂元素成矿区域的研究相对较少,比较有代表性的只有河南省地质矿产勘查开发局班宜红团队^[8]借助水系沉积物对新疆托盖勒克地区的锂找矿前景做出预测的研究。

随着经济技术的进步和区域地质调查工作的展

收稿日期:2023-10-18;修回日期:2023-11-20

基金项目:青海省重点研发与转化计划项目(2023-SF-113)

作者简介:吕翰羿(1996-),男,硕士研究生,研究方向:地球化学。Email:1660848644@qq.com。

通信作者:程怀德(1976-),男,博士,研究员,主要从事成盐元素地球化学和盐类资源开发利用研究。Email:chenghuaide@isl.ac.cn。

开,越来越多的含锂矿床被发现。2020年,青海省地质调查局在柴北缘茶卡北山地区发现了富含锂铍等稀有金属的伟晶岩型矿床。茶卡北山锂铍稀有金属伟晶岩矿床与茶卡流域间相互联通,伟晶岩矿体在风化、剥蚀过程中形成的碎屑物质可在茶卡流域河谷中发生沉积。因此,该区域可用于研究伟晶岩矿体和水系沉积物间锂元素的继承性。

伟晶岩型锂矿中常见的含锂矿物主要有锂辉石、透锂长石、锂云母、铁锂云母^[9-13]。伟晶岩锂矿中常见含锂矿物和脉石矿物密度如表1所示。由于赋存锂元素的锂辉石、锂云母等属于密度较大的重矿物,因此在工业生产过程中,常使用高密度的重液对品位较低的粗矿进行浮选以分离杂质,获取品位更高的精矿^[14-17]。茶卡流域水系沉积物中除锂云母等富锂矿物外,还存在长石、石英等密度相对较小的杂质矿物。杂质矿物与富锂矿物的密度差异相对较小,因此在进行重液分选时,需要根据矿物密度的差异逐级精细化处理。

表1 常见含锂矿物与伴生矿物的类型和密度
Table 1 The type and density of usual lithium minerals and lode minerals

矿物类型	矿物密度/(g·cm ⁻³)
透锂长石(Trilithium feldspar)	2.30 ~ 2.50
铁锂云母(Zinnwaldite)	2.90 ~ 3.20
锂辉石(Spodumene)	3.10 ~ 3.20
锂云母(Lepidolite)	2.80 ~ 2.90
电气石(Tourmaline)	2.98 ~ 3.20
黑云母(Biotite)	3.02 ~ 3.12
石英(Quartz)	2.22 ~ 2.65
钠长石(Albite)	2.62 ~ 2.66
斜绿泥石(Clinocllore)	2.61 ~ 2.78
多硅白云母(Phengite)	2.76 ~ 3.10
微斜长石(Microcline)	2.54 ~ 2.57
方解石(Calcite)	2.70 ~ 2.71
角闪石(Hornblende)	3.00 ~ 3.40

本研究针对茶卡流域水系沉积物,进行了分级重液分选,确定了在搬运沉积的过程中水系沉积物锂含量的变化趋势、水系沉积物保留的富锂矿物主要类型及其密度区间,并建立了指示伟晶岩型锂矿床探矿的新方法。

1 矿床地质背景

茶卡北山锂铍稀有金属伟晶岩矿床位于宗务隆构造带东段^[18],出露的地层主要有:古元古代达肯大

坂群、新元古代金水口群、寒武-奥陶纪滩涧山群以及石炭-二叠系土尔根大坂组等^[18]。矿床所在区域内发育有断裂构造,其展布方向有北西向和近东西向^[19]。矿床所在区域内火成岩岩性复杂,基性到酸性的各类火成岩均有出露,其中分布最广泛的是中酸性岩浆侵入岩。矿床所在区域内的变质作用以低绿片岩相区域变质作用和动力变质作用为主。变质岩的主要类型为板岩和千枚岩^[20]。

矿床内共有356条伟晶岩脉,依据其围岩岩性的差异,可将其划分为3条不同的伟晶岩带^[21]。I号带围岩主要是石英闪长岩,II号带围岩主要是中粒二云石英片岩,III号带围岩主要是糜棱岩化石英闪长岩。含锂矿物在I、II、III号带均有分布^[21]。茶卡北山锂铍稀有金属伟晶岩矿床的含锂矿物具有明显的垂向分带特征,根据岩相学特征,可将其分为石榴电气二云母花岗伟晶岩、文象结构电气白云母花岗伟晶岩、条带状构造石榴电气白云母花岗伟晶岩、含绿柱石榴电气白云母花岗伟晶岩、含绿柱石榴辉石石榴电气白云母花岗伟晶岩、含锂辉石石榴电气白云母花岗伟晶岩6个岩相带,根据其矿化程度划分,可将其分为无矿化、铍矿化、锂铍矿化、锂矿化4个矿化带^[21]。锂辉石是茶卡北山锂铍稀有金属伟晶岩矿床中主要的含锂矿物类型^[19-23]。

综合前人对茶卡北山锂铍稀有金属伟晶岩矿床及其周边位置的研究成果可知,茶卡北山地带的主要富锂载体为黑云母、锂云母和锂辉石,与含锂矿物共生的主要脉石矿物为石英、钠长石、斜绿泥石、多硅白云母、角闪石、蒙脱石和方解石^[24]。

2 样品采集与分选

2.1 样品采集

采样区域位于究日肯郭勒区域和森木涛休苑隆哇区域。野外调查发现究日肯郭勒区域的水流支流较少,在该区域发现了数量较多的富锂云母类矿物,因此称其为锂云母沟(后同)。森木涛休苑隆哇区域存在较多支流,在该区域发现了锂含量较高的锂辉石,因而将其称为锂辉石沟(后同)。采集样品的类型有水系沉积物和固体岩石。数量共计17件,其中水系沉积物13件,固体岩石4件。除样品CK-I-1-2外,其余固体岩石样品在检测时均使用分拣出的内部单矿物。

各个样品的类型、地理位置如图2和表2所示。

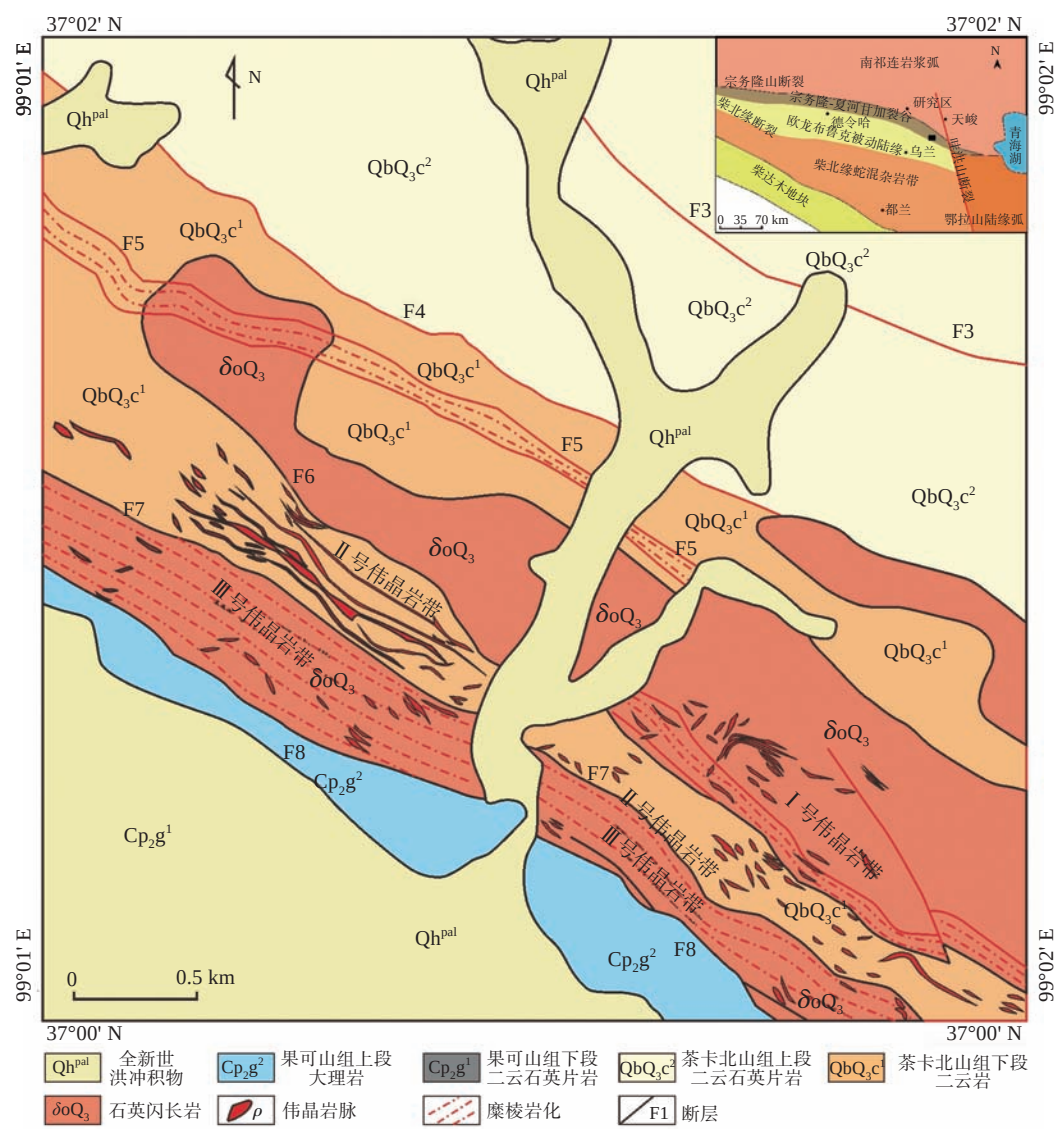


图 1 茶卡北山区域地质图(根据刘承先等,2021和李善平等,2022修改)

Fig. 1 The simplified geology of the North Caka mountain

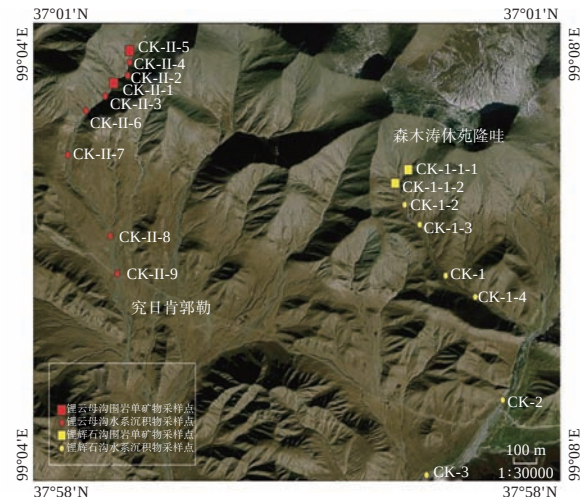


图 2 茶卡北山区域采样点位置天地图

Fig. 2 The map of sample locations in the North Caka mountain

2.2 实验过程

在地表动力地质作用过程中极易发生元素的迁移,以锂为代表的相容元素可能因化学反应转化为其他赋存形式而流失。基于上述原因,在采集水系沉积物样品时主要选择距离伟晶岩矿床较近的部分流域的样品,同时在分析水系沉积物中的锂含量时,需要使用合适的方法对含锂的矿物进行富集从而达到还原物源区元素、矿物组成信息的目的。本研究采用的锂元素富集方法为重液分选,分选实验过程如图 3 所示。

样品各称取 50 g,烘干后研磨至 200 目。使用无水乙醇(AR,分析纯)和三溴甲烷(AR,分析纯)按照

表2 茶卡北山地区样品原样及其重液分选分样各项测试结果

Table 2 The experimental results about the samples in the North Caka mountain

样品名称	样品类型	经度(E)	纬度(N)	原样锂含量/(g·t ⁻¹)	2.70轻质锂含量/(g·t ⁻¹)	2.70重质锂含量/(g·t ⁻¹)	2.80轻质锂含量/(g·t ⁻¹)	2.80重质锂含量/(g·t ⁻¹)	锂元素富集密度区间/(g·cm ⁻³)	总重矿物回收率/%	锂富集密度区间回收率/%	锂元素富集倍数
CK-1	水系沉积物	99°07'15"	36°59'19"	9.18	8.22	5.37	9.96	5.46	2.70~2.80	8.67	4.64	1.08
CK-2	水系沉积物	99°07'38"	36°58'36"	10.15	8.22	19.81	13.17	2.74	2.70~2.80	9.62	17.51	1.95
CK-3	水系沉积物	99°07'05"	36°58'09"	8.69	5.72	3.33	17.74	1.81	2.70~2.80	2.28	9.87	2.04
CK-I-1-1	锂辉石单矿物	99°6'58.77"	36°59'54.08"	31194.02								
CK-I-1-2	伟晶岩围岩	99°6'56.57"	36°59'49.20"	109.22								
CK-I-2	水系沉积物	99°6'58.69"	36°59'42.45"	12.40	10.25	9.01	33.46	4.17	2.70~2.80	13.20	9.88	2.70
CK-I-3	水系沉积物	99°7'4.87"	36°59'35.44"	18.12	17.12	17.35	25.48	12.39	2.70~2.80	4.43	12.23	1.41
CK-I-4	水系沉积物	99°7'27.16"	36°59'12.21"	8.14	8.4	28.79	9.48	4.27	2.70~2.80	5.16	21.48	3.53
CK-II-1	云母单矿物	99°5'4.33"	37°0'27.16"	156.38								
CK-II-2	水系沉积物	99°5'2.67"	37°0'27.28"	35.49	33.81	56.91	49.02	65.87	大于2.80	3.38	3.38	1.85
CK-II-3	水系沉积物	99°5'3.09"	37°0'26.70"	24.42	13.53	13.13	69.16	17.42	2.70~2.80	7.23	12.04	2.83
CK-II-4	水系沉积物	99°5'8.19"	37°0'31.33"	46.53	15.94	21.73	59.59	6.52	2.70~2.80	7.24	16.44	1.28
CK-II-5	云母单矿物	99°5'8.28"	37°0'33.84"	84.94								
CK-II-6	水系沉积物	99°4'50.74"	37°0'14.41"	4.93	5.66	6.00	70.52	4.20	2.70~2.80	16.02	17.69	14.30
CK-II-7	水系沉积物	99°4'43.97"	37°0'0.05"	4.65	7.30	3.92	16.10	1.10	2.70~2.80	17.57	13.79	3.46
CK-II-8	水系沉积物	99°5'0.55"	36°59'32.27"	14.59	9.35	11.57	27.51	3.35	2.70~2.80	8.72	31.57	1.89
CK-II-9	水系沉积物	99°5'2.99"	36°59'19.84"	13.73	5.44	9.53	26.31	20.76	2.70~2.80	12.17	25.07	1.91

一定比例混合配置密度为 2.69 g/cm³ 和 2.82 g/cm³ 的重液。

称取原样样品,加入 20 mL 密度为 2.69 g/cm³ 的无水乙醇-三溴甲烷混合重液,在 1 500 r/min 的转速下离心 60 min,分相后,得到相对密度<2.69 的上层轻质和相对密度>2.69 的下层重质。分别过滤、洗涤干燥后,称取两部分质量并分别保存于塑封袋内,命名为“2.70 轻质”和“2.70 重质”。

称取 2.70 重质,加入 20 mL 密度为 2.82 g/cm³ 的无水乙醇-三溴甲烷混合重液,在 1 500 r/min 的转速下离心 60 min,分相后,得到相对密度<2.82 的上层轻质和相对密度>2.82 的下层重质。分别过滤、洗涤干燥后,称取两部分质量并分别保存于塑封袋内,命名为“2.80 轻质”和“2.80 重质”。

将原样、2.70 轻质、2.70 重质、2.80 轻质和 2.80 重质各称取部分放入陶瓷坩埚内置于烘箱中以 60 ℃ 加热 4 h 烘干后记录其质量,随后将之转移到马弗炉

中以 1 000 ℃ 煅烧 3 h。煅烧结束后冷却至室温,加入 2 mL 硫酸 H₂SO₄(分析纯,AR)后再次放入马弗炉中,以 240 ℃ 加热 40 min,之后将坩埚内的固液混合物转移至 100 mL 容量瓶内,定容后静置 12 h,取上层清液制样。

2.3 分析

样品测试分为锂元素含量测试和水系沉积物矿物物相分析测试两部分,由中国科学院青海盐湖研究所盐湖化学分析测试中心完成。其中,锂元素含量测试(ICP-MS)所用仪器为美国珀金埃尔默(Perkin Elmer)公司 NexION2000B 型等离子体发射质谱仪,检出限 1 μg/L。矿物物相分析测试(XRD)根据国家标准 SY-T 6210-1996(沉积岩中黏土矿物总量和常见非黏土矿物 X 射线衍射定量分析方法)测试,测试仪器为荷兰马尔文帕纳科(Malvern Panalytical)公司 AERIS 型 X 射线衍射仪。

3 结果与讨论

3.1 水系沉积物锂元素地球化学特征分析

3.1.1 茶卡北山水系沉积物锂元素含量

全球地壳锂元素平均含量约为 13.00 g/t^[1],中国水系沉积物平均背景值相对于全球地壳的浓集系数

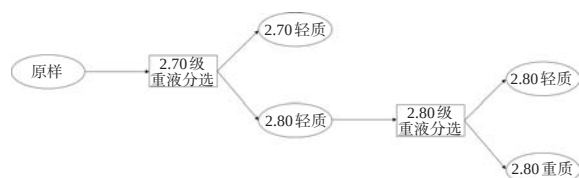


图3 实验流程图

Fig. 3 Experimental flow chart

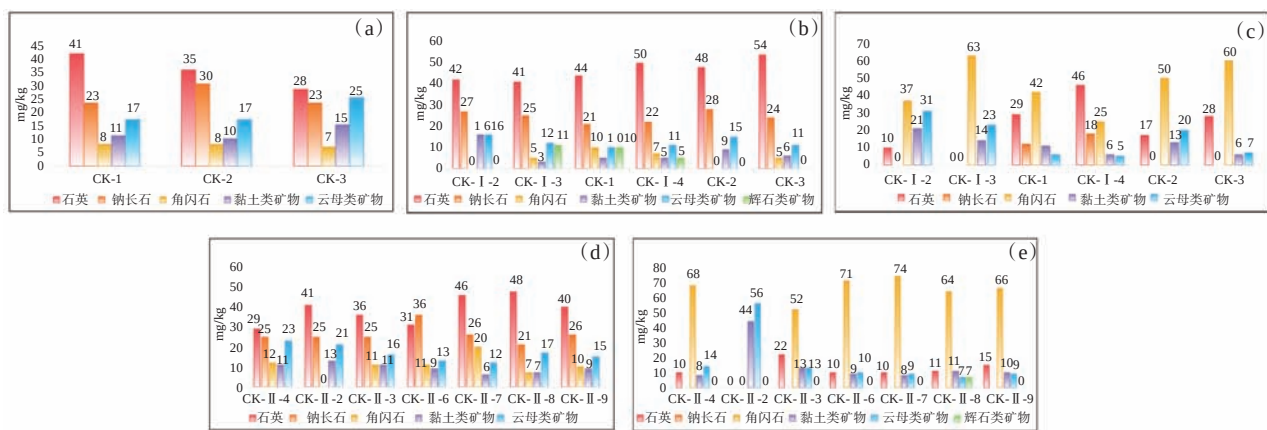
为1.00。其中,茶卡北山地区所属的昆仑—祁连—秦岭造山系区域相对于中国水系沉积物平均背景值的浓集系数为0.96^[25,26],即该地区的地表水系沉积物平均克拉克值约为12.48 g/t。茶卡北山地区锂辉石沟和锂云母沟水系沉积物样品的原样锂含量如表2所示,对比ICP-MS测试所得的茶卡北山地区锂辉石沟、锂云母沟水系沉积物锂元素含量与昆仑—祁连—秦岭造山系区域水系沉积物背景值可知,在锂辉石沟,除CK-I-3外,其余水系沉积物样品锂含量均低于区域克拉克值。在锂云母沟,除CK-II-6和CK-II-7外,其余水系沉积物样品锂含量均高于区域

克拉克值。

3.1.2 茶卡北山锂辉石沟和锂云母沟水系沉积物锂含量变化特征

茶卡北山地区固相单矿物锂含量如表2所示,对比锂辉石沟和锂云母沟的样品锂元素含量可发现,锂辉石沟的含锂单矿物锂元素含量高于锂云母沟的含锂单矿物,但锂云母沟水系沉积物比锂辉石沟水系沉积物样品中的锂元素含量整体上更高。

茶卡北山水系沉积物样品2.80级重液分选实验精选矿物的XRD测试结果如图4所示。



(a) 茶卡北山部分水系沉积物原始样品XRD实验结果; (b) 锂辉石沟水系沉积物2.80级重液分选轻质XRD实验结果; (c) 锂辉石沟水系沉积物2.80级重液分选重质XRD实验结果; (d) 锂云母沟水系沉积物2.80级重液分选轻质XRD实验结果; (e) 锂云母沟水系沉积物2.80级重液分选重质XRD实验结果。

图4 茶卡流域水系沉积物2.80分选分样矿物组成X射线衍射测试结果

Fig. 4 The X-ray diffraction results of the stream sediment in the North Caka mountain after heavy-fluid separation (Density ratio: 2.80)

XRD 测试结果显示,除在少数分样(CK-I、CK-I-3)内检测到辉石类矿物以外,绝大多数样品及其分样中锂元素富集的矿物类型均为云母类矿物。锂云母沟的含锂矿物中锂元素含量低于锂辉石沟,但锂云母沟的水系沉积物中整体锂元素平均含量高于锂辉石沟。鲍文(Bowen)、海德曼(Headman)和张旗等^[27-29]的研究认为,矿物形成时的温度压力条件与地表条件的差异越大,越容易风化,因此结晶温度高的早期矿物抗风化能力普遍弱于结晶温度低的后期矿物。在鲍文反应序列中,锂辉石所属的辉石类矿物结晶顺序早于云母类矿物,因此云母类矿物拥有更好的抗风化能力,常见矿物的结晶顺序如图5所示。

在风化与河流侵蚀的过程中,锂辉石等早期结晶矿物转化为可溶性物质随流水运移至他处,而含锂的云母类矿物则被保留下来进入水系沉积物。基于上述原因,锂云母沟的水系沉积物整体锂元素平

均含量高于锂辉石沟。

为了规避除含锂伟晶岩以外围岩风化剥蚀对水

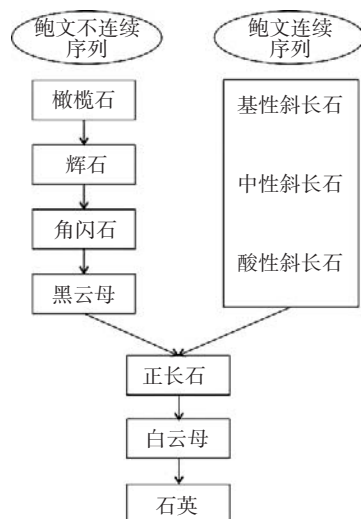


图5 鲍文序列

Fig. 5 Bowen reaction sequence

系沉积物中锂含量的影响,本研究对采样区的典型围岩样品 CK-I-1-2 进行了 X 射线衍射测试,测试结果如表 3 所示。

表 3 样品 CK-I-1-2 的 XRD 测试结果

Table 3 The X-ray diffraction results of CK-I-1-2

矿物类型	石英	角闪石	钠长石	绿泥石	云母类矿物
半定量结果	38	29	29	3	1

实验结果表明,茶卡北山地区内伟晶岩锂矿外的围岩中云母类矿物含量极少,因此围岩风化剥蚀对水系沉积物的云母类矿物的补充可以忽略不计。

3.1.3 茶卡北山水系沉积物原样锂元素含量的地理分布

元素在迁移和富集的过程中可能会伴随岩石淋滤补给、次生黏土矿物吸附、水体混合与蒸发作用等不同自然过程的作用。此类自然过程对锂元素在地表环境下的迁移所造成的影响是无法忽视的。从源到汇的过程中,河流搬运的物质在重力与水动力作用的影响下,会发生特定组分的矿物富集或丢失的现象^[30]。在碎屑物质随着流水介质运移的过程中,具有不同水力行为的矿物存在不同的受影响结果。位于茶卡北山地区的锂云母沟和锂辉石沟采样区内,存在“运移距离增加”和“水流汇入”两种不同的

河流过程。茶卡北山地区水系沉积物原样锂元素含量在地理位置上的分布如图 6 所示。

在锂云母沟 CK-II-4 至 CK-II-7 段和锂辉石沟 CK-I-3 至 CK-I-1 段未出现水道汇入等其他影响,因此可用作分析水系沉积物原样锂元素和运移距离间的相关性研究。综合分析该两段原样所测得的锂元素含量可发现:在没有水流汇入时,搬运距离越远,水系沉积物内的锂元素含量越低。其中,锂云母沟无水道汇入段的水系沉积物平均锂元素衰减梯度为 $0.0529 \text{ g}/(\text{t} \cdot \text{m})$,锂辉石沟无水道汇入段的水系沉积物平均锂元素衰减梯度为 $0.0277 \text{ g}/(\text{t} \cdot \text{m})$ 。但搬运距离与锂元素含量衰减间的相关性为非线性相关。例如:CK-II-4 至 CK-II-2 间的水系沉积物锂元素衰减梯度为 $0.0643 \text{ g}/(\text{t} \cdot \text{m})$,CK-II-2 至 CK-II-3 间的水系沉积物锂元素衰减梯度为 $0.8323 \text{ g}/(\text{t} \cdot \text{m})$,CK-II-3 至 CK-II-6 间的水系沉积物锂元素衰减梯度为 $0.0505 \text{ g}/(\text{t} \cdot \text{m})$,CK-II-6 至 CK-II-7 间的水系沉积物锂元素衰减梯度为 $0.0010 \text{ g}/(\text{t} \cdot \text{m})$ 。

另一方面,在茶卡北山地区锂云母沟 CK-II-7 至 CK-II-8 段、CK-II-8 至 CK-II-9 段以及锂辉石沟 CK-I-2 至 CK-I-3 段、CK-I-1 至 CK-I-4 段、CK-I-4 至 CK-2 段和 CK-2 至 CK-3 段间存在水道的汇入。观察该段样品原样所测得的锂元素含量可发现,在未

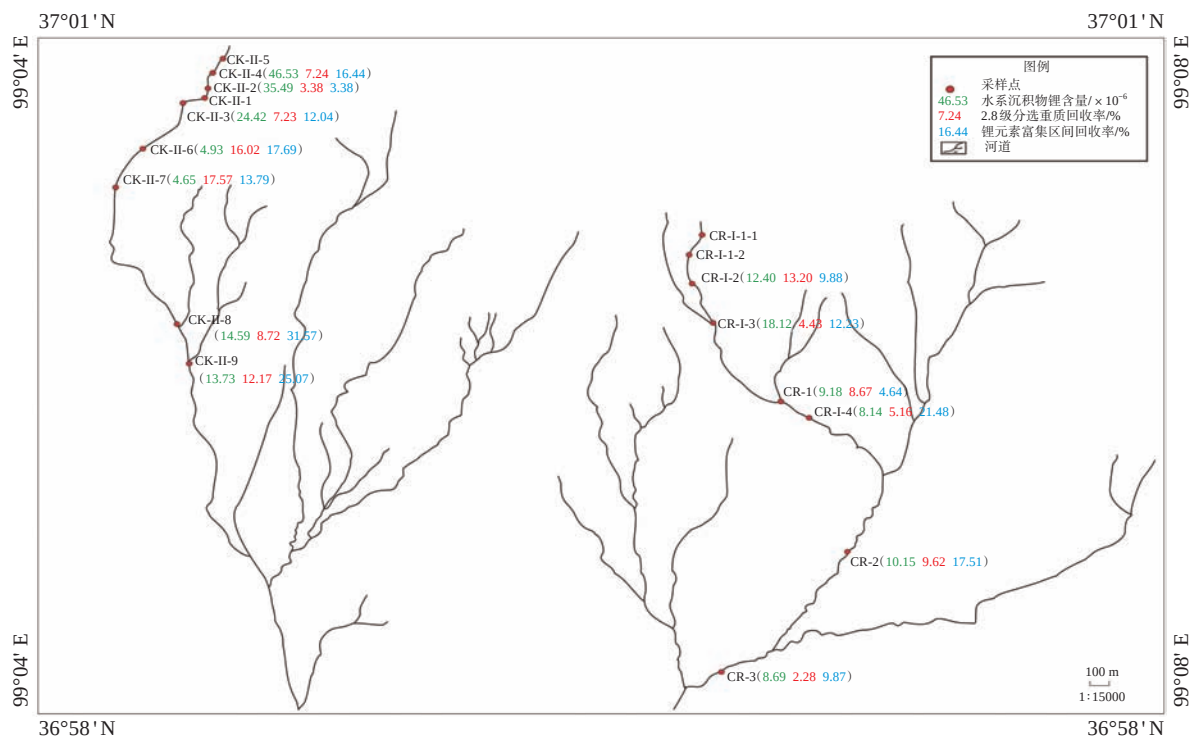


图 6 茶卡北山水系沉积物各项测试结果的地理分布

Fig. 6 The geographical distribution of experimental results about the stream sediment in the North Caka mountain.

发生水流汇入时,锂辉石沟中的锂元素变化趋势仍然符合搬运距离越远,水系沉积物内的锂元素含量越低这一现象。但水流汇入可以明显减缓水系沉积物中锂元素随搬运距离增长而衰减的趋势,更有部分样品(CK-I-3、CK-2)出现了水流汇入令水系沉积物中锂元素含量上升的情况。综上,水流汇入对水系沉积物中锂元素含量的影响为正相关。

3.2 河流过程对茶卡北山水系沉积物锂元素富集区间的影响

3.2.1 河流过程对水系沉积物重液分选实验回收率的影响

茶卡北山地区锂辉石沟和锂云母沟水系沉积物样品重液分选实验的总重矿物回收率和锂元素富集区间回收率如表 2 所示,茶卡北山地区水系沉积物重液分选实验的总重矿物回收率和锂元素富集区间回收率在地理位置上的分布如图 6 所示。通过分析茶卡北山地区水系沉积物重液分选实验的总重矿物回收率和锂元素富集区间回收率在地理位置上的分布可以发现,水系沉积物样品中总重矿物占比与该样品相对于源区搬运距离间不存在明显的统计学相关性。水系沉积物样品中锂元素富集密度区间矿物占比与该样品相对于源区搬运距离间不存在明显的统计学相关性。

3.2.2 河流过程对水系沉积物重液分选锂元素富集密度的影响

布雷德利(Bradley)、弗拉基米诺夫(Vladimirov)和陈衍景等^[9-12]认为,锂元素大多富集于锂辉石、电气石、石榴子石等密度较大的重矿物中,因此通常情况下锂元素的峰值应当位于重液分选实验产物中最重的部分,即锂元素的优选富集区间在密度最大的位置。但这一观点与茶卡北山地区水系沉积物重液分选分样检测结果存在差异。为解释这一现象,本研究对茶卡北山水系沉积物 2.8 级重液分选所得精选轻质、重质和部分水系沉积物原样进行了 X 射线衍射检测。同时测定了逐级重液分选实验所得的轻质与重质的锂含量。茶卡北山水系沉积物逐级重液分选所得分样锂含量如表 2 所示。

在茶卡北山地区水系沉积物及其重液分选分样中未找到电气石和石榴子石,存在辉石类矿物的也只有个别分样(CK-1、CK-I-3、CK-II-8)。锂含量测试结果显示,在茶卡流域地区水系沉积物中,除样品 CK-II-2 符合上述逻辑以外,其余样品的锂元素含量

峰值均出现在密度 2.70 到 2.80 的区间内。由此可见,河流过程对茶卡北山水系沉积物锂元素含量优选富集区间造成了明显的影响。霍福斯(Hoefs)^[31]认为在地表动力地质作用体系下,锂辉石等因生成含锂重矿物都属于易风化的矿物。在发生风化作用时,除锂云母外,其他类型的含锂矿物均可将锂元素以锂离子的形式释放出来,与卤族元素结合形成易溶锂盐发生迁移。在迁移过程中,锂离子可以被黏土矿物吸附。因此在黏土矿物含量较高的地区,往往可以检测到锂元素的正/异常。在河流对含锂岩石的侵蚀以及搬运过程中,抗风化能力较差的辉石类矿物被破坏,抗风化能力较好的云母类矿物保留至沉积物中。茶卡北山地区的矿物 XRD 分析测试结果显示,该区域的黏土类矿物含量很低,因此在搬运过程中对水系沉积物锂元素含量影响最大的过程仍是风化过程。

3.3 水系沉积物重液分选伟晶岩型锂矿床探矿的指示意义

地表动力地质作用包括了破坏、搬运和沉积等多个阶段,这一过程可以导致水系沉积物中锂元素的明显损耗,影响地表动力地质作用中锂元素流失的主要因素包括蚀源区含锂矿物的类型、沉积区黏土类矿物的吸附作用、运移距离的大小和河流水体间的混合过程。当区域内的黏土矿物含量较低,吸附作用的强度相对较弱时,锂元素会在相对密度较大的岩浆结晶矿物内发生富集。在水系相对复杂的区域,当河流内不存在其他水道汇入时,水系沉积物中锂含量会随着搬运距离的增加而发生衰减,但锂含量的衰减与运移距离的关系为非线性相关。当河流内存在其他水道汇入时,水道汇入与水系沉积物锂含量的关系为正相关。

逐级精细化的重液分选实验可以将水系沉积物中不同密度的矿物进行有效地分离。经多次重液分选后,重质矿物中的石英、长石等较小密度矿物含量减少,角闪石等大密度矿物含量明显增加。重液分选过程可以使水系沉积物中锂元素进行富集,富集效果明显,富集倍数最高可达 14.30 倍。在重液分选实验中,富集区间矿物的回收率和重矿物回收率与样品地理位置分布不存在明显的统计学相关性。实验结果表明:茶卡北山地区内水系沉积物锂元素的赋存载体主要为富锂云母。河流流域中水系沉积物锂元素优选富集密度分布区间为云母类矿物的密度

段(相对密度为2.70~2.80)。综上,重液分选过程可以在一定程度上还原蚀源区的含锂性质。

由于不同类型的矿物结晶顺序不同,在表生环境下抗风化能力不同,因此部分早期结晶的含锂矿物可能会在风化、剥蚀、搬运和沉积的过程中转化为可溶锂盐而造成锂元素的流失。基于上述原因,依托于水系沉积物直接寻找锂辉石等易风化富锂矿物存在较大困难。逐级精细化的重液分选过程可以还原被地表动力地质作用覆盖的含锂矿物信息,将以富锂云母为主要载体的沉积物含锂矿物进行富集,从而达到确定固体岩石中富锂云母存在的效果。云母类矿物和辉石类矿物在伟晶岩型矿床中是依次结晶的矿物,在花岗伟晶岩内二者可以共存。锂云母和锂辉石相互共生的伟晶岩锂矿床在世界各地广泛分布,该类矿床在亚洲、非洲、欧洲和南美等地区均有发现^[32-35]。依托于重液分选过程,寻找到水系沉积物中以富锂云母为主要载体的含锂矿物,即可确定蚀源区富锂云母类矿物的存在,从而确定与富锂云母共生的锂辉石等含锂矿物的存在,达到寻找固体伟晶岩锂矿床的目的。

4 结 论

(1) 影响水系沉积物中锂含量的因素包括蚀源区和沉积区的矿物类型、蚀源区到沉积区的搬运距离、搬运过程中的水体混合作用。

(2) 逐级精细化的重液分选可以对水系沉积物内不同密度的矿物进行有效分离,该过程也对水系沉积物中的锂元素产生了明显的富集作用。富集倍数最高达到14.30倍。锂元素富集于相对密度2.70至2.80的范围内。

(3) 水系沉积物重液分选可作为未知地区伟晶岩型锂矿床探矿指示的方法,通过分析锂含量和锂富集密度段,可以确定不易风化的含锂矿物的存在,进而为进一步寻找伟晶岩型锂矿床提供技术依据。

参考文献

- [1] 中国科学院地球化学研究所. 高等地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 茹克娅·热介甫. 新星爆发对银河系锂增丰的贡献[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [3] 韦容. 含锂/锌硅酸盐生物活性材料的制备及体外生物学性能研究[D]. 上海: 中国科学院上海硅酸盐研究所, 2022.
- [4] 赵彬涛, 张敏, 李乃霖, 等. 锂金属电池发展及材料分析[J]. 山东化工, 2023, 52(14): 88-91+97.
- [5] 王峰, 孙飞龙, 陶祥力. 锂电池在常规潜艇上的应用设想[J]. 船电技术, 2023, 43(8): 27-30.
- [6] 蒋起保, 欧阳永棚, 章敬若, 等. 江西省贵溪市水系沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 326-334.
- [7] 秦丹鹤, 侯红星, 邵兴坤. 青海曲旁浪斜地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J]. 地质与资源, 2023, 32(4): 418-426.
- [8] 班宜红, 涂良权, 芦西战, 等. 新疆托盖勒克地区1:5万水系沉积物测量地球化学特征及锂找矿前景[J]. 矿产勘查, 2020, 11(4): 764-774.
- [9] 陈衍景, 薛莅治, 王孝磊, 等. 世界伟晶岩型锂矿床地质研究进展[J]. 地质学报, 2021, 095(10): 2971-2995.
- [10] Vladimirov A G, Lyakhov N Z, Zagorsky V Y, et al. Lithium deposits of spodumene pegmatites of Siberia[J]. Chemistry for Sustainable Development, 2012, 20(1): 3-20.
- [11] London D. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 101: 349-383.
- [12] Bradley D C, McCauley A, Buchwaldt R, et al. Lithium-cesium tantalum pegmatites through time, their I orogenic context, and relationships to the super continent cycle[J]. Geological Society of America Abstracts with Programs, 2012, 44(7): 294.
- [13] Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, et al. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 48(5): 55-69.
- [14] 绿海. 重介质选矿技术及其在锂辉石选矿中的应用[J]. 新疆有色金属, 2018, 41(S1): 71-73.
- [15] 丁晓姜. 重液浮沉试验在宜昌磷矿选矿中的作用与意义[J]. 化工矿产地质, 2022, 44(3): 282-287.
- [16] 刘广学, 戴科伟, 常学勇, 等. 某低品位伟晶岩型锂辉石选矿试验[J]. 现代矿业, 2018, 34(11): 99-102+109.
- [17] 廖明和, 许温复, 王学平. 锂辉石重液分选试验[J]. 非金属矿, 2003, (6): 40-41.
- [18] 强娟. 青藏高原东北缘宗务隆构造带花岗岩及其构造意义[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- [19] 刘承先, 孙丰月, 钱烨, 等. 青海柴北缘地区茶卡北山锂铍稀有金属伟晶岩型矿床垂向分带特征[J]. 世界地质, 2021, 40(4): 847-859+880.
- [20] 吕书俊, 董国臣, 罗志波, 等. 茶卡北山锂辉石花岗岩伟晶岩锂矿化特征及成矿时限[J]. 岩石矿物学杂志, 2023, 42(3): 350-364.
- [21] 陈静, 韩杰, 余福承, 等. 青海茶卡北山锂稀有多金属矿床白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar定年及其地质意义[J]. 地质找矿论丛, 2022, 37(2): 142-147.
- [22] 王秉璋, 潘彤, 王强, 等. 青藏高原东北缘茶卡北山地区印支期高分异花岗岩的发现及找矿意义[J]. 岩石学报, 2023, 39(8): 2402-2428.
- [23] 李善平, 潘彤, 严兴鹏, 等. 柴北缘东段茶卡北山伟晶岩稀土元素地球化学特征及物源分析[J]. 稀土, 2022, 43(4): 88-99.
- [24] 王建国, 张世珍, 邢佳, 等. 乌兰茶卡北山含矿伟晶岩地球化学特征及地质意义[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(6): 809-821.
- [25] 史长义, 梁萌, 冯斌. 中国水系沉积物39种元素系列背景值[J]. 地球科学, 2016, 41(2): 234-251.
- [26] 伦知颖, 程志中, 严光生, 等. 中国不同景观区水系沉积物中

- 39种元素的背景值[J]. 地学前缘, 2015, 22(5): 226-230.
- [27] Bowen N J. Diffusion in silicate melts. Journal Geology [J]. 1921, 25: 205-243.
- [28] Bowen N J. The Evolution of the Igneous Rocks [D]. Princeton: Princeton University Press, 1928.
- [29] 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩结晶分离作用问题——关于花岗岩研究的思考之二[J]. 岩石学报, 2007(6): 1239-1251.
- [30] 李思琪, 谢远云, 康春国, 等. 物源—河流过程—化学风化对松花江水系沉积物重矿物组成的影响[J]. 地质科学, 2022, 57(1): 207-229.
- [31] Jochen H. Stable isotope geochemistry [M]. Berlin: Springer, 1980.
- [32] Herbert P, Uwe K. Monitoring of lithium contents in lithium ores and concentrate-assessment using X-ray diffraction (XRD) [J]. Mining & Minerals, 2021, 11, 1058.
- [33] Khromykh S.V, Oitseva T.A, Kotler P D, *et al.* Rare-Metal pegmatite deposits of the Kalba Region, Eastern Kazakhstan: Age, composition and petrogenetic Implications [J]. Minerals, 2020, 10(11): 1017.
- [34] Zimanovskaya N.A, Oitseva T.A, Khromykh S.V, *et al.* Geology, Mineralogy, and Age of Li-bearing pegmatites: Case Study of Tochka Deposit (East Kazakhstan) [J]. Minerals 2022, 12, 1478.
- [35] Gourcerol B, Gloaguen E, Jérémie M, *et al.* Re-assessing the European lithium resource potential-A review of hard-rock resources and metallogeny [J]. Ore Geology Reviews, 2019, 109: 494-519.

Heavy-Fluid Separation of the North Caka Mountain Stream Sediment and its Significance to Search Pegmatite Lithium Ore

LÜ Hanyi^{1,2,3}, CHENG Huaide^{1,2*}, LI Binkai^{1,2}, MA Haizhou^{1,2}, LI Yongshou^{1,2},
HAN Wenhua^{1,2}, WANG Jinsi^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: The pegmatite deposit is one of the important sources of lithium. Due to the heterogeneity in time, space, and structure, the exploration of pegmatite deposit is difficult. During the migration process, the stream sediment could retain mineral information about the source area. Therefore, analyzing the elements and minerals of the stream sediment can reconstruct the composition characteristics of the source area. One of the effective methods to searching for pegmatite lithium deposits is to investigate the depletion and enrichment of lithium heavy minerals in the stream sediment, as well as changes in particle size. The research object of this article is the stream sediment of the North Caka mountain. After refined heavy-fluid separation work, the separation of heavy and light minerals has been achieved. Experimental results indicate that the heavy-fluid separation method has an enrichment effect on lithium minerals in sediment. Fluvial processes can influence the lithium in stream sediments. With the farther the transport distance, the less lithium in the stream sediments. Stream mixing can have a positive effect on the lithium in stream sediment. The carrier of lithium is mica minerals those enrich lithium. The lithium content increases by 3 to 14 times compared to before sorting, and there is a significant difference in mineral composition after sorting. This change can find lithium bearing pegmatite minerals. Therefore, the heavy-fluid separation of stream sediment is an important indicator method for the exploration of pegmatite lithium ore.

Key word: North Caka mountain; Pegmatite lithium ore; Stream sediment; Heavy-Fluid separation; Geochemical prospecting