

川西热达门伟晶岩型稀有金属矿床锂辉石 C-H-O 同位素组成及意义

张伟^{1,2}, 邹林^{1,2}, 唐文春¹, 黄健^{1,2}, 段威^{1,2},
杨贵兵¹, 范映武^{1,2}, 李小松^{1,2}, 黄建国³

(1. 四川省地质矿产勘查开发局化探队, 四川 德阳 618000; 2. 四川省深地地质勘查有限公司, 四川 德阳 618000; 3. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 热达门稀有金属矿床位于川西可尔因伟晶岩型矿田的南西部, 文章在详细的矿床地质特征研究基础上, 系统采集同一矿脉同一矿体不同标高(3540~3830 m)的矿石, 分析测试了锂辉石单矿物中的 C-H-O 同位素组成以及不同矿物中的包裹体特征。矿物中包裹体主要以富液相包裹体为主, 锂辉石中包裹体盐度集中于 8%~20%, 均一温度 180~330℃, 属于中-低盐度、中-高温成矿流体; 石英中包裹体盐度集中于 0%~8%, 均一温度 150~240℃, 属于低盐度、低温流体。C-H-O 同位素测试结果显示热达门稀有金属矿床中的锂辉石 δD 值为 -97.5‰~-104.7‰ (平均 -102.8‰), 相对于可尔因地区其他锂矿床, δD 值明显偏小, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 -0.34‰~2.88‰ (平均 1.032‰), 表明成矿流体可能有大气降水的混入, 并受到了围岩黑云母而长花岗岩体的影响。矿床中锂辉石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值为 -10‰~-16.6‰, 平均 -12.7‰, 反映主成矿期碳的来源具有岩浆系统和大气降水系统的混合性质, 与岩浆-地幔源(花岗岩、地幔多相体系)的低温蚀变有关, 并可能混入部分由沉积有机物质经脱羧基作用(decarboxylation)生成 CO_2 。通过对矿物 C-H-O 同位素及流体包裹体进行研究, 进一步明确了成矿流体来源及演化过程。

关键词: 伟晶岩型; 稀有金属; 锂辉石; C-H-O 同位素; 热达门

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.006

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)01-0045-10

川西花岗伟晶岩型稀有金属成矿带是我国最重要的稀有金属成矿带之一, 主要包括甲基卡和可尔因两个矿田^[1-2]。近年来, 可尔因矿田内相继发现了李家沟、党坝、业隆沟、热达门等数个超大型、大型稀有金属(锂)矿床, 可尔因矿田预测氧化锂远景资源量可达 700 万 t^[1-3]。

近年来, 随着勘查工作的进行, 前人对可尔因矿田进行了大量研究, 对可尔因矿田成矿模式、成岩(矿)时代、成矿背景、成矿流体来源等进行了研究。唐文春等李家沟锂矿总结了伟晶岩“高氧逸度、低密度、低温”成矿作用, 建立“构造-岩浆-流体耦合的伟晶岩大脉”成矿模式,

成功指导发现了党坝超大型锂矿。李建康等^[4]系统研究了可尔因复式岩体的演化规律, 从岩浆结晶分异程度的角度分析了不同类型伟晶岩分布的位置和原因, 初步总结了可尔因稀有金属矿床的成矿模式。大量研究成果表明, 成矿时代集中于 190~210 Ma^[1], 形成于造山后构造背景。费光春^[4]等通过对李家沟锂辉石矿床中含锂辉石(锂云母)伟晶岩进行研究, 提出成矿流体早期以岩浆水为主, 后期存在大气降水的加入, 含锂矿物沉淀发生在高-中温、富 CO_2 的流体中。

热达门稀有金属矿床目前正处于勘查评价阶段, 前期仅对其矿床地质特征及成矿模式进行了

收稿日期: 2022-10-18

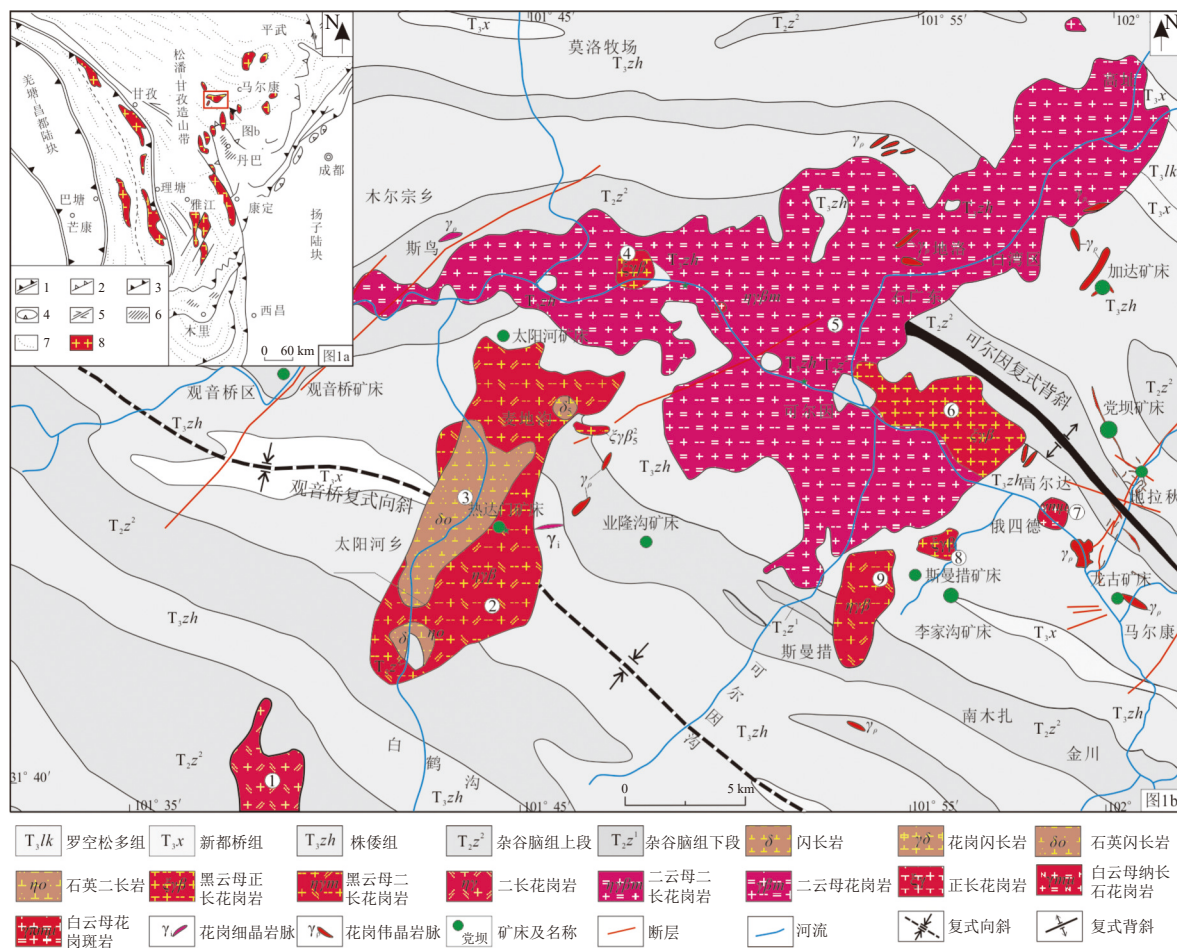
基金项目: 四川省地质矿产勘查开发局“四川可尔因花岗伟晶岩田重点锂矿区找矿突破研究(SCDKKJXM-2018002)”

作者简介: 张伟(1984-), 男, 高级工程师, 研究方向为地质调查与矿产勘查。

通信作者: 黄健(1971-), 男, 高级工程师, 研究方向为矿产地质调查与勘查工作。

研究^[5], 研究程度较低。随着勘查工作进行, 矿床规模已达大型, 通过对比发现, 相对于李家沟、党坝等锂矿床, 热达门矿床具有以下不同特征: ①主矿体围岩主要为太阳河黑云母二长花岗岩, 而非三叠系西康群变沉积岩或者侏倭组角岩; ②距可尔因岩体中心的二云母花岗岩地表出露边界距离超过 8 km (一般为 3~5 km^[6-8]); ③在垂

直方向上, 锂位于伟晶岩中上部, 铍位于中下部, 矿化元素分带极为清晰。这些不同提高了可尔因西南部稀有金属找矿潜力, 本文通过对热达门稀有金属矿床地质特征、锂辉石 C-H-O 同位素的研究, 探讨锂辉石的成矿流体来源, 以期进一步拓展可尔因矿田找矿空间, 为可尔因西南部稀有金属找矿工作提供依据。



1. 蛇绿混杂岩带; 2. 滑脱带; 3. 逆冲断层; 4. 飞来峰; 5. 平移断层; 6. 深层高温韧性滑脱剪切带; 7. 褶皱轴线; 8. 中生代花岗岩; ①-斯尼楞措岩体; ②-太阳河岩体; ③-热达门岩体; ④-年克岩体; ⑤-可尔因岩体; ⑥-木足渡岩体; ⑦-根则岩体; ⑧-木足岩体; ⑨-斯曼措岩体

图 1 可尔因伟晶岩矿田地质简图 (据文献 [7,11] 修改)

Fig.1 Geological sketch map of the Keeryin pegmatite ore field

1 区域地质背景

热达门稀有金属矿床隶属金川县观音桥镇, 位于可尔因伟晶岩矿田的西南部 (图 1), 其大地构造位置位于松潘—甘孜造山带中部, 秦岭造山带南部, 羌塘—昌都陆块以东, 扬子陆块西缘^[9] (图 1a)。松潘—甘孜地体造山事件主要发生在晚三叠世, 是三叠系晚期华北板块和羌塘—昌都陆块与扬子板块相互俯冲、碰撞的结果^[10]。由于成

矿过程中经历了古特提斯和新特提斯两个造山阶段, 该区域上主要出露的地层为以巨厚层沉积-变质岩为主的西康群^[1], 包括中三叠统杂谷脑组 (T_2z)、晚三叠统株倭组 (T_3zh)、晚三叠统新都桥组 (T_3x)、晚三叠统罗空松多组 (T_3lk) 等地层, 其岩性主要由一系列灰黑色长英质砂岩、粉砂岩、绢云母板岩、泥质板岩及灰岩等组成, 总厚度大于 5500 m。受印支晚期构造作用影响, 区域发育大量褶皱与断层, 其中北西-南东向的可

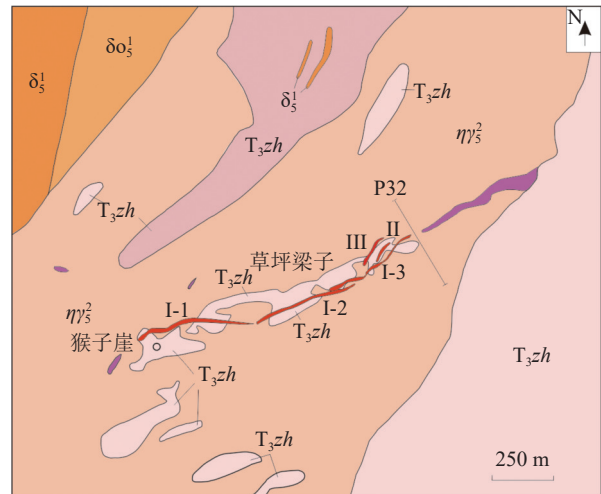
尔因复式背斜和观音桥复式向斜对区域控矿具有重要意义^[2] (图1)。

可尔因一带发育大量中酸性侵入岩,面积约250 km²,区域上出露的岩浆岩包括太阳河-热达门岩体、可尔因复式岩体两大岩体,两大岩体虽然在成岩时间上相近,但是成岩方式与岩浆物质来源均有所差异,因此二者之间联系有限^[11]。太阳河-热达门岩体位于可尔因矿田西南部,形成于碰撞环境下,岩浆由下地壳物质部分熔融形成^[12],以黑云母二长花岗岩为主,其次为石英闪长岩。石英闪长岩主要分布于热达门附近,但并未参与成矿;黑云母二长花岗岩则出露于业隆沟西侧。可尔因复式岩体由可尔因岩体、木则岩体、斯曼措岩体等多个岩体构成,位于可尔因矿田东北部,成岩时间集中于180~230 Ma^[5,8,9,13],是松潘-甘孜变质沉积岩在角闪岩相环境下深度20 km以上部分熔融形成^[14-16],主要出露二云母花岗岩,沿可尔因复式背斜侵入,面积约188 km²,可尔因复式岩体东部出露黑云母正长花岗岩,东南部零星出露少量黑云母二长花岗岩,控制了包括李家沟锂辉石矿、党坝锂辉石矿、斯曼措锂辉石矿等多个锂辉石矿床^[17-18]。

2 矿床地质特征

矿区内发现各类伟晶岩脉共计16条,据其矿化特征,可划分为含Li伟晶岩脉、含Be伟晶岩脉和其他伟晶岩脉三种^[2]。位于矿区南部热达门矿段中的I-1、I-2、I-3号矿体最为重要(图2),均赋存在I号伟晶岩脉中,经工程证实,I号伟晶岩脉其走向延伸超过2000 m(P31至P56号勘查线),倾向延深大于800 m。该条伟晶岩深部(海拔+3400 m以下)主要为粗粒含电气石钠长石型伟晶岩;其中部海拔+3400~+3900 m之间主要为中细粒锂辉石钠长石型伟晶岩;而其上部可见细粒钠长石型伟晶岩;石英脉则出现在该伟晶岩带走向上相对更高的位置。围岩一般为太阳河黑云母二长花岗岩(侵位时间为印支—燕山期,岩体年龄为180~229 Ma^[8,19-21]),亦有上三叠统侏倭组(T_{3zh})角岩(捕虏体)、片岩。围岩一般表现为角岩化、石榴子石化等热接触变质特征。伟晶岩脉矿化不均匀,在垂向(上侵)具一定的分带性,矿体西—中段浅部矿化强烈,向深部锂矿化减弱而铍矿化增强。中—东段锂矿体延深至高程3500 m以上(图3),并有继续向东部、深部延伸的趋势^[22-24]。BeO相对富集的部位主要在岩脉体

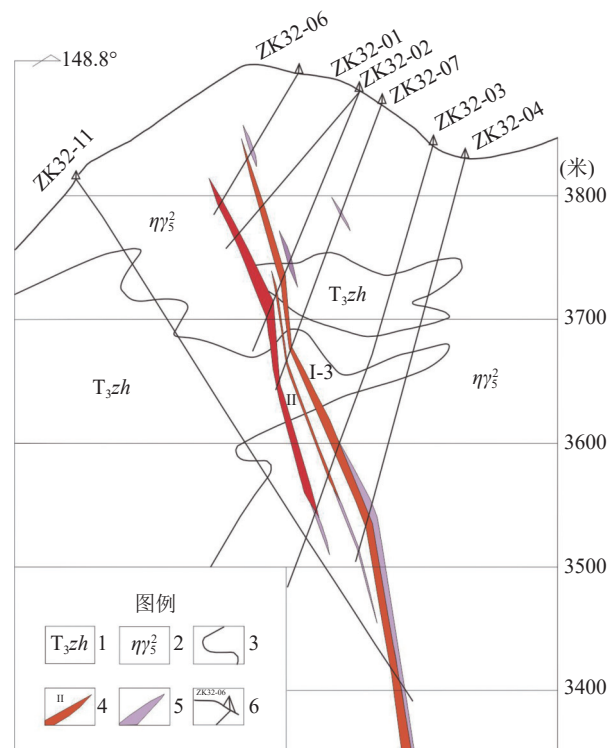
的深部,在Li₂O含量贫化的区域,二者形成的矿体总体上表现出相互分离的现象,矿体伴生Nb、Ta和Rb等稀有金属,Nb₂O₅为0.0035%~0.0114%,平均0.0079%,Ta₂O₅为0.0014%~0.0060%,平



图例 T_{3zh} 1 δ₅ 2 δ_{o5} 3 η₅ 4 I-1 5 I-2 6 I-3 7 P32 8
1. 上三叠统侏倭组; 2. 闪长岩; 3. 石英闪长岩; 4. 黑云二长花岗岩; 5. 锂矿体及编号; 6. 伟晶岩脉; 7. 地质界线; 8. 勘查线

图2 热达门矿床地质简图

Fig.2 Geologicai sketch map of Redamen deposit



1. 上三叠统侏倭组; 2. 黑云二长花岗岩; 3. 地质界线; 4. 锂矿体及编号; 5. 伟晶岩; 6. 钻孔及编号

图3 热达门矿床32号勘探线剖面简图

Fig.3 No.32 exploration line section of Redamen deposit

均 0.0036%，达到综合利用指标，可进行综合回收利用；BeO 为 0.015%~0.056%，平均 0.04%，Rb₂O 为 0.07%~0.21%，平均 0.12%，达到综合回收指标要求，但选矿实验表明其未在精矿或者尾矿当中富集，无法进行回收利用。

含矿伟晶岩主要为伟晶结构（中粒、粗粒结构为主），次为交代熔蚀结构（图 4d、4e）、碎裂结构，其他如它形粒状结构、蠕虫结构（图 4c）、筛状结构（图 4f）在矿石中亦较常见，主要矿物成分为长石、石英、锂辉石和云母，含量达 80%~90%，其他矿物主要有铌钽铁矿、绿柱石和电气石等。矿石中锂辉石以中-细晶板柱状结构为

主，晶体呈半自形-自形定向分布（图 4a），长 1~10 cm，宽 0.1~2 cm。长石、石英等则以中-细晶它形粒状结构为主，云母主要呈中-细晶自形片状结构。矿石以块状构造为主，矿体边部局部可见条带状构造（图 4b）。矿体中锂辉石含量为 10%~30%，少量绿柱石及微量铌钽铁矿。脉石矿物主要有石英、钠长石和微斜长石。其他副矿物含量较少，分布不均，有电气石、锆石、磷灰石等。矿体中 Li₂O 含量为 0.71%~2.46%，平均 1.25%，BeO 含量为 0.021%~0.061%，平均 0.0036%，Nb₂O₅ 含量为 0.0024%~0.0076%，平均 0.0079%，Ta₂O₅ 含量为 0.0019%~0.0121%，平均 0.0036%^[25-26]。

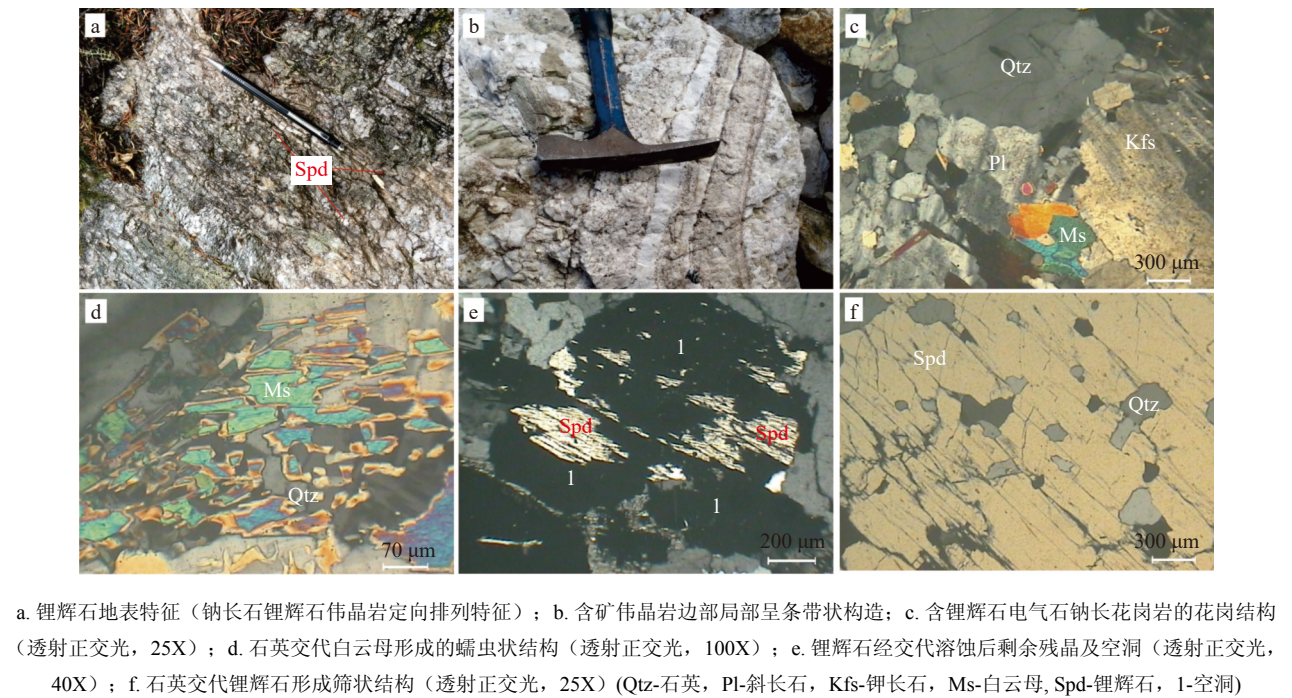


图 4 热达门矿床伟晶岩露头及镜下显微照片

Fig.4 Photos of outcrop rock specimens and micrographs of Redamen deposit

3 样品采集及测试方法

经过精细地野外地质调查和综合分析，本次系统采集了同一矿脉（I 号）中的同一矿体（I-3），但不同标高（从而反映垂直方向上的变化规律，图 3）（表 1）的钻孔岩心矿石样品 5 件。样品在剖面上主要反映伟晶岩脉的向上（或向外）延伸发育特征。同时，根据野外大量观察和研究，我们认为同一矿脉不同标高中的锂辉石是同一成矿阶段所形成，只是矿物组成可能存在一定的差异，可能与成矿温度、交代、围岩等有一定的关系。

流体包裹体测试与 C-H-O 同位素质谱测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进

行，流体包裹体测试首先通过镜下观察，确定测试对象，然后通过 LINKAM THMS600 型冷热台

表 1 热达门稀有金属矿床 P32 剖面采样情况

Table 1 P32 profile sampling situation of Redamen rare metal deposit

序号	工程名称	矿体名称	样号	高程/m	品位 (Li ₂ O/%)
1	ZK32-01		H2、H3	3793	(2.38, 1.77) (平均2.08)
2	ZK32-02		H8、H10	3735	(1.85, 1.62) (平均1.74)
3	ZK32-07	I-3	H8、H7	3678	(1.28, 1.25) (平均1.27)
4	ZK32-03		H3、H2	3615	(1.51, 1.28) (平均1.40)
5	ZK32-04		H10、H9	3540	(2.12, 2.21) (平均2.17)

测试其均一温度、冰点温度。C、H 同位素分析仪器型号为 MAT-253 稳定同位素质谱仪（编号：8633），O 同位素分析仪器型号为 Delta v advantage 气体同位素质谱计（编号：11278）。O 同位素测试根据 BrF_5 法^[27] 获得纯净的 O_2 ，再将纯化后的 O_2 在 700°C 与石墨反应转化为 CO_2 ，最后送质谱测试。H 同位素测试通过爆裂法分离获得水，再使用 Zn 还原法^[28] 获得可供质谱测试的 H_2 。C 同位素测试是先将样品烘干，然后使用爆裂法获得包裹体中气体，再用组合冷阱分离出 CO_2 ，最后送质谱测试。氢同位素（ δD ）以 V-SMOW 标准报出，氧同位素（ $\delta^{18}\text{O}$ ）以 V-SMOW 和 V-PDB 标准报出，碳同位素（ $\delta^{13}\text{C}$ ）以 V-PDB 标准报出。其中 C、O 同位素分析精确度为 $\pm 0.2\text{‰}$ ，H 同位素精确度为 $\pm 2\text{‰}$ ^[29]。

4 讨论

4.1 流体包裹体特征

锂辉石矿物中包裹体极为发育，主要为成群分布、成带状分布，其中以呈透明无色的纯液包

裹体与呈无色-灰色的富液体包裹体为主，部分视域内发育呈无色-灰色的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 三相包裹体与呈无色-深灰色的富气体包裹体；石英矿物中包裹体极为发育，主要为成群分布、成带状分布，其中以呈无色-灰色的富液体包裹体为主，其次为呈透明无色的纯液包裹体、呈无色-灰色的富气体包裹体与呈深灰色的气体包裹体，部分视域内发育呈无色-灰色的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 三相包裹体。测试结果见表 2。

通过表 2、图 5 可以看出，整体盐度较低，锂辉石盐度范围为 $2.57\%\sim 19.29\%$ ，主要集中于 $8\%\sim 20\%$ ，属于中-低盐度流体；石英盐度范围为 $1.64\%\sim 14.46\%$ ，主要集中于 $0\%\sim 8\%$ ，属于低盐度流体。结合图 6 可以看出，锂辉石中的流体包裹体均一温度分布不均匀， CO_2 均一至液相温度范围为 $25.9\sim 30.4^\circ\text{C}$ ，均一温度范围为 $158\sim 338^\circ\text{C}$ ，主要集中于 $180\sim 330^\circ\text{C}$ ，属于中-高温成矿流体；石英中的流体包裹体均一温度分为两类， $150\sim 240^\circ\text{C}$ 与 $270\sim 330^\circ\text{C}$ ，主要集中于 $150\sim 240^\circ\text{C}$ ，属于低温流体， CO_2 均一至液相温度范围为 $22.9\sim 29.7^\circ\text{C}$ 。

表 2 流体包裹体测试结果
Table 2 Fluid inclusion test results

样品编号	赋存矿物	个数	气液比/%	均一温度/ $^\circ\text{C}$	$T_{\text{h, CO}_2}/^\circ\text{C}$	盐度/%
ZK32-01-H3	石英	13	10~85	169~303	24.9~28.2	3.01~8.82
	锂辉石	11	10~35	166~271	29.1~29.3	8.00~12.32
ZK32-02-H10	石英	9	10~40	149~307	26.4	1.91~7.92
	锂辉石	13	10~80	179~331	29.2	2.57~19.29
ZK32-07-H7	石英	7	10~35	146~297	29.0~29.2	1.64~13.57
	锂辉石	18	20~25	269~317	\	5.51~6.03
ZK32-03-H3	石英	9	10~35	189~332	22.9~27.4	4.33~14.46
	锂辉石	24	10~15	178~259	\	10.73~16.15
ZK32-04-H10	石英	6	15~60	197~332	29.6~29.7	5.05~7.05
	锂辉石	29	10~60	158~338	25.9~30.4	7.59~17.87

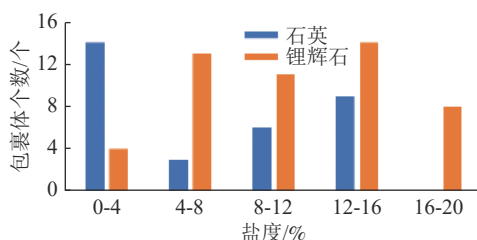


图 5 包裹体盐度
Fig.5 Inclusion salinity

综上所述，成矿早期以中-高温、中-低盐度的岩浆热液为主，并伴随少量大气降水或地下水渗入。随着成矿作用的进行，成矿流体来源逐渐发生改变，以中-低温、低盐度的流体为主，表明后期存在大量大气降水或地下水的渗入。

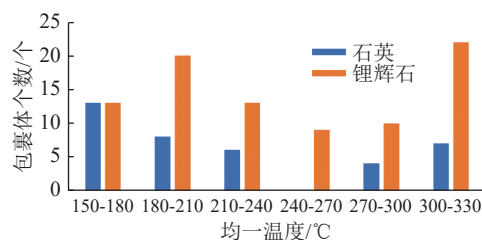


图 6 包裹体均一温度
Fig.6 Inclusion homogenization temperature

4.2 H-O 同位素特征

热达门及可尔因矿田区其他伟晶岩型稀有金属矿床锂辉石 C、H、O 同位素组成及计算结果见表 3。从表 3 中可以看出，热达门稀有金属矿床锂辉石的 δD 为 $-97.5\text{‰}\sim -104.7\text{‰}$ （平均 -102.8‰ ），

$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-0.34\text{‰} \sim 2.88\text{‰}$ (平均 1.032‰)，在不同标高上 H-O 同位素值并无出现规律性变化，与可尔因锂辉石的 δD ($-83\text{‰} \sim -100\text{‰}$ ，平均 -92.25‰)、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ($0.54\text{‰} \sim 6.54\text{‰}$ ，平均 4.19‰) 较为接近，在氢同位素数值上，明显低于李家沟矿床锂辉石的 δD (为 $-61.6\text{‰} \sim -85.5\text{‰}$ ，平均 -73.8‰)。热达门稀有金属矿床锂辉石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$

为 $-10\text{‰} \sim -16.6\text{‰}$ ，平均 -12.7‰ ，在不同标高上数值并无规律性变化，与李家沟矿床晚期成矿阶段锂辉石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ ($-11.8\text{‰} \sim -18.7\text{‰}$ ，平均 -16.0‰) 范围较为一致，而与可尔因矿床锂辉石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ ($-7\text{‰} \sim -10.3\text{‰}$ ，平均 -8.58‰) 差距较大，后者 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值明显偏大^[30-32]。

表 3 可尔因矿田稀有金属矿床锂辉石 C、H、O 同位素组成
Table 3 Spodumene C, H, O isotopic composition of rare metal deposit in Keeryin ore field

序号	样号	岩性	矿床	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	T/℃	来源
1	KEYK-1	白云母钠长石锂辉石伟晶岩	可尔因	16	-14.5	-89	-7	5.64	242	据文献[17]
2	KEYK-10			10.9	-19.4	-83	-9.8	0.54	242	
3	KEYK-2			14.4	-16.0	-97	-10.3	4.04	242	
4	KEYK-6			16.9	-13.6	-100	-7.2	6.54	242	
5	LPD1H2	钠长石锂辉石伟晶岩	李家沟矿床晚期成矿阶段	11.1	-19.2	-61.6	-11.8	-0.21	220	据文献[9]
6	LPD2H2			14	-16.4	-68.7	-16.2	2.69	220	
7	LPD3H2			13	-17.4	-79.4	-17.2	1.69	220	
8	LPD4H2			11.7	-18.6	-85.5	-18.7	0.39	220	
9	ZK32-01	钠长石锂辉石伟晶岩	热达门床	12.4	-17.9	-104.1	-11	1.58	231	本文
10	ZK32-02			11.2	-19.1	-97.5	-10	-0.34	215	
11	ZK32-07			12.1	-18.2	-104.3	-16.6	2.88	273	
12	ZK32-03			11.6	-18.8	-102.5	-14	0.43	223	
13	ZK32-04			11.3	-19.1	-105.6	-12	0.61	234	

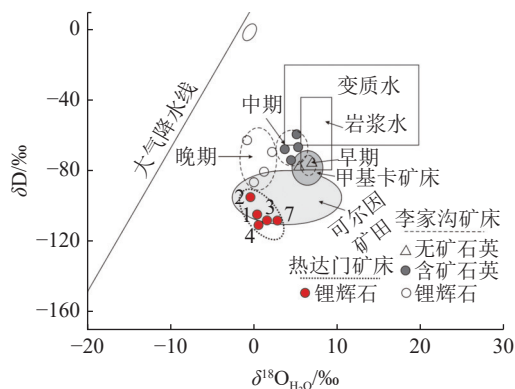
注：①锂辉石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值通过平衡分馏公式方程 $1000 \ln \alpha = 2.75 \times 10^6 / T^2$ [32] 计算得出；② $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = 0.97002 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - 21.98$ [33]；③ $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰} = 1.03092 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰} + 30.92$ [33]

从热达门稀有金属矿床成矿流体 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 组成 (图 7) 中更加明显直观地看出，锂辉石的 H-O 同位素投点多数位于可尔因矿田范围内，位于李家沟矿床晚期锂辉石投点的下方，说明热达门稀有金属矿床晚期成矿作用 (即锂辉石主成矿期) 的成矿流体有大气降水的混入。邓运等认为李家沟矿床锂辉石、石英的 C、H、O 同位素反映成矿流体早期来源于岩浆水，晚期有大气降水的混

入^[8]。廖芝华等也认为党坝矿床锂辉石、石英的 C、H、O 同位素反映成矿流体主要为岩浆水来源，与深部岩浆活动有关，流体在迁移过程中混入了少量的大气来源流体^[3]。

热达门稀有金属矿床锂辉石成矿流体 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-97.55\text{‰} \sim -105.6\text{‰}$ ，平均 -102.8‰ (表 2、表 3)，低于邻区可尔因矿田 ($-83\text{‰} \sim -100\text{‰}$)，也低于李家沟矿床 ($-61.6\text{‰} \sim -85.5\text{‰}$)。火成岩中氢主要存在于角闪石和黑云母等含水矿物中，其 δD 值一般为 $-30\text{‰} \sim 180\text{‰}$ ，但绝大多数为 $-50\text{‰} \sim -90\text{‰}$ ，其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $5\text{‰} \sim 13\text{‰}$ ，从基性岩到酸性岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有明显增高趋势。花岗岩的 δD 值在 $-50\text{‰} \sim -85\text{‰}$ 之间，通常贫 $\delta^{18}\text{O}$ 的花岗质岩石， δD 也较低。 δD 值低于 -85‰ 的火成岩，往往受到大气降水高温热液蚀变作用的影响。花岗岩中的黑云母和角闪石的 δD 值很少高于 -60‰ 。但是，富白云母的花岗闪长岩和伟晶岩的 δD 值高达 $-60\text{‰} \sim -35\text{‰}$ 。一般认为，这些岩石曾经以某种方式与大气降水或海水发生过同位素的交换^[34-35]。

热达门矿床锂辉石成矿流体 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值偏低，并不在火成岩范围内，“正常”岩浆水的 H 同位素为 $-50\text{‰} \sim -85\text{‰}$ ，若为晶洞碱性花岗岩，其 H



(底图据 [9, 41])

图 7 热达门稀有金属矿床成矿流体 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 组成
Fig.7 δD - $\delta^{18}\text{O}$ of fluids from Redamen rare metal deposit

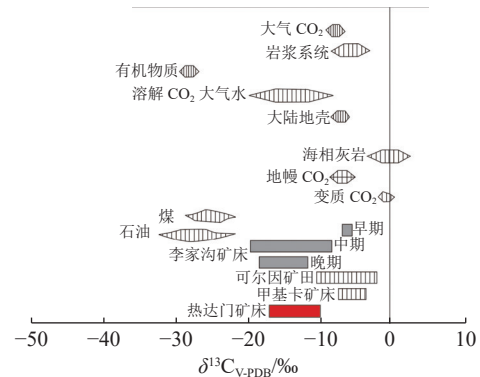
同位素均低于“正常”岩浆水的 H 同位素值^[36-38]，李培忠通过钾长石的 δD 估算，对应全岩的 δD 值为 $-106\text{‰} \sim -144\text{‰}$ ^[39]，变质水的 H 同位素数值相对岩浆水总体上较大，最高可达 -40‰ ^[40]。而岳相元等认为热达门矿床的围岩主要属于亚碱性过铝质高钾钙碱性 S 型花岗岩^[20]。因此，热达门矿床锂辉石 δD_{V-SMOW} 值偏低可能与其围岩黑云二长花岗岩有关，含矿热液与围岩黑云二长花岗岩发生交代作用，导致含矿热液的 δD_{V-SMOW} 值偏低。热达门矿床交代作用可能一致持续到锂辉石成矿后期，在矿体内形成交代、溶蚀残晶及空洞（图 4e、4f），对锂辉石矿物晶体进行了改造，使锂辉石矿体发生了局部贫化。

4.3 C 同位素特征

主要地质体或碳储库的碳同位素组成之间 $\delta^{13}C$ 值差别较大，使碳同位素能够成为示踪流体来源的重要手段之一。从碳同位素组成（图 8）可以看出，热达门稀有金属矿床锂辉石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 范围与李沟矿床的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 范围基本一致，数值略有偏大。邓运等^[9]认为李家沟锂辉石矿床成矿早期 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值与岩浆系统（ $-9\text{‰} \sim -3\text{‰}$ ）^[38]或者地幔（ $-5\text{‰} \sim -7\text{‰}$ ）^[39]相似，显著的高于有机质（ -27‰ ）、大气 CO_2 （ -8‰ ， $-7\text{‰} \sim -11\text{‰}$ ）^[42]、大陆地壳（ -7‰ ）^[43]、溶解 CO_2 大气水（ $-9\text{‰} \sim -20\text{‰}$ ）^[44]等碳库数值。李家沟矿床成矿中期 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值的范围与溶解 CO_2 大气水高度相似，也有极少部分分布于岩浆系统，成矿晚期 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值则完全处于溶解 CO_2 大气降水范围内。 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 在李家沟矿床成矿中期与晚期的值比成矿早期的值更低，说明成矿流体的碳来源在中后期发生了改变，成矿中期的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值有少部分处于岩浆系统说明成矿流体的改变属于过渡性质。热达门稀有金属矿床锂辉石中的 $\delta^{13}C$ 范围（ $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 为 $-10\text{‰} \sim -16.6\text{‰}$ ，平均 -12.7 ）也具有类似的特征。即主成矿期（锂辉石形成期）碳的来源具有岩浆系统和大气降水系统的混合性质，这与 H-O 同位素组成图解（图 6）所反映的信息基本一致。对于热达门稀有金属矿床 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 范围总体偏右（平均值偏大）等信息，可能与热达门矿床的矿体部分围岩为花岗岩类有关。花岗岩类中的 $\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$ 值相对于沉积有机物而言，具有明显偏高的特征（图 9）。

在 $\delta^{18}O_{SMOW}/\text{‰} - \delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$ 图解（图 9）中，给出了地壳流体中 CO_2 的三大主要来源（有机质、海相碳酸盐岩和岩浆-地幔源）的碳、氧同

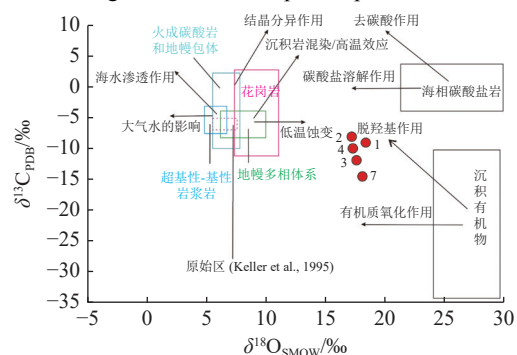
素值范围，并用箭头标出了从这 3 个物源经 8 种主要过程产生 CO_2 时，其同位素组成的变化趋势^[45-47]。从图 9 可以看出，热达门稀有金属矿床锂辉石中碳、氧同位素值投影位于典型的岩浆-地幔源与有机质源之间，与岩浆-地幔源（花岗岩、地幔多相体系）的低温蚀变有关，并可能混入部分由沉积有机物质经脱羧基作用（decarboxylation）生成 CO_2 。



（底图据 [42]）

图 8 碳同位素组成

Fig.8 Carbon isotope composition



（底图据 [45]）

图 9 热达门稀有金属矿床锂辉石的 $\delta^{18}O - \delta^{13}C$ 图解

Fig.9 $\delta^{18}O$ versus $\delta^{13}C$ diagram of spodumene from Redamen rare metal deposit

本文通过对热达门稀有金属矿床伟晶岩脉中的锂辉石与石英进行流体包裹体及 C-H-O 同位素进行研究，对其成矿流体来源及演化过程进行研究，结合野外工作情况，在热达门矿床西南侧发现相同的岩体，同时有少量含锂辉石钠长石伟晶岩脉出露，是未来的重点找矿区域。

5 结 论

（1）矿物中包裹体主要以富液相包裹体为主，成矿流体以锂辉石中的包裹体为主，盐度集中于 $8\% \sim 20\%$ ，均一温度 $180 \sim 330^\circ C$ ，属于中-

低盐度、中-高温成矿流体；后期流体以石英中的包裹体为主，盐度集中于 0%~8%，均一温度 150~240℃，属于低盐度、低温流体。表明成矿早期以中-高温、中-低盐度的岩浆热液为主，并伴随少量大气降水或地下水渗入，后期存在大量大气降水或地下水的渗入。

(2) 热达门稀有金属矿床中锂辉石的 δD 为 -97.5‰~-104.7‰（平均-102.8‰），相对于矿田南东部的李家沟矿床明显偏小； $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 -0.34‰~-2.88‰（平均 1.032‰），与李沟矿床锂辉石主成矿期值基本一致，表明成矿流体可能有大气降水的混入。锂辉石 $\delta D/\text{‰}$ 值偏低可能是含矿热液与围岩黑云二长花岗岩发生交代作用，导致含矿热液的 δD_{V-SMOW} 值偏低造成的。

(3) 热达门稀有金属矿床中锂辉石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}/\text{‰}$ 为 -10~-16.6，平均-12.7，反映主成矿期碳的来源具有岩浆系统和大气降水系统的混合性质，与岩浆-地幔源（花岗岩、地幔多相体系）的低温蚀变有关，并可能混入部分由沉积有机物质经脱羧基作用（decarboxylation）生成 CO_2 。

(4) 热达门稀有金属伟晶岩矿床和区域内李家沟、党坝伟晶岩型锂矿矿床的成矿地质特征有所不同，其产出位置位于远离可尔因岩体南西侧的太阳河-热达门岩体中。通过调查发现，在热达门矿床西南侧有零星的含锂辉石钠长石伟晶岩脉出露，可当做下一步找矿的重点区域。

参考文献：

- [1] 费光春, 杨峥, 杨继忆, 等. 四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定: 来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据[J]. *地质学报*, 2020, 94(3):836-849.
- [2] 张伟, 邹林, 范映武, 等. 四川金川县热达门锂辉石矿地质特征及矿床成矿模型浅析[J]. *四川地质学报*, 2019, 39(增刊.):55-59.
- [3] 廖芝华, 周中国, 张洪平. 可尔因稀有金属矿床液态不混溶作用的地球化学特征证据[J]. *四川地质学报*, 2019, 39(增刊.):60-69.
- [4] LIAO Z H, ZHOU Z G, ZHANG H P. Evidence of geochemical characteristics of liquid immiscibility of Kerin rare metal deposit[J]. *Journal of Sichuan Geology*, 2019, 39(Suppl.):60-69.
- [5] G Fei, JF Menuge, C Chen, et al. Petrogenesis of the Lijiagou spodumene pegmatites in Songpan-Garze Fold Belt, West Sichuan, China: Evidence from geochemistry, zircon, cassiterite and coltan U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. *Lithos*, 2020:364.
- [6] 李建康, 王登红, 张德会, 等. 川西伟晶岩型矿床的形成机制及大陆动力学背景 [M]. 北京: 原子能出版社, 2007, 1-20.
- [7] LI J K, WANG D H, ZHANG D H, et al. Formation mechanism and continental dynamic background of pegmatite deposits in western Sichuan [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007, 1-20.
- [8] 李金. 四川金川马场沟锂辉石矿床地质特征及成因分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018, 1-66.
- [9] LI J. Geological characteristics and genesis analysis of Machanggou spodumene deposit in Jinchuan, Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018, 1-66.
- [10] 古城会. 四川省可尔因伟晶岩田东南密集区锂辉石矿床成矿规律[J]. *地质找矿论丛*, 2014, 29(1):59-65.
- [11] GU C H. Mineralization law of spodumene deposit in the southeast dense area of Kelin pegmatite field in Sichuan province[J]. *Geological Prospecting Thesis*, 2014, 29(1):59-65.
- [12] 王子平, 刘善宝, 马圣钊, 等. 四川阿坝州党坝超大型锂辉石矿床成矿规律及深部和外围找矿方向 [J]. *地球科学*, 2018, 43(6):2029-2041.
- [13] WANG Z P, LIU S B, MA S C, et al. Metallogenic regularity of Dangba super-large spodumene deposit in Aba Prefecture, Sichuan Province and prospecting direction in deep and peripheral areas[J]. *Earth Science*, 2018, 43(6):2029-2041.
- [14] 邓运, 费光春, 李剑, 等. 四川李家沟伟晶岩型锂辉石矿床碳氢氧同位素及成矿时代研究 [J]. *矿物岩石*, 2018, 38(3):40-47.
- [15] DENG Y, FEI G C, LI J, et al. Study on hydrocarbon oxygen isotope and metallogenic epoch of pegmatite type spodumene deposit in Lijiagou, Sichuan[J]. *Minerals and Rocks*, 2018, 38(3):40-47.
- [16] [10] 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. *地质学报*, 2018, 92(6):1091-1106.
- [17] XU Z Q, WANG R C, ZHAO Z B, et al. On the tectonic setting of “hard rock type” large lithium ore belt in Chinese mainland[J]. *Acta geologica Sinica*, 2018, 92(6):1091-1106.
- [18] [11] 唐文春, 段威, 邹林, 等. 川西可尔因地区伟晶岩型锂矿地球化学指标定位矿体的方法 [J]. *地质力学学报*, 2022, 28(5): 765-792.
- [19] TANG W C, DUAN W, ZOU L, et al. A method for locating ore bodies by geochemical indexes of pegmatite-type lithium deposits in the Ke'eryin area, western Sichuan, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(5): 765-792.
- [20] [12] 岳相元, 张贻, 周雄, 等. 川西可尔因矿集区稀有金属矿床成矿规律与找矿方向 [J]. *矿床地质*, 2019, 38(4):867-876.
- [21] YUE X Y, ZHANG Y, ZHOU X, et al. Mineralization law and prospecting direction of rare metal deposits in Kelin ore concentration area, western Sichuan[J]. *Deposit Geology*, 2019, 38(4):867-876.

- [13] Deschamps, Fabien, Benoit, et al. Coeval mantle-derived and crust-derived magmas forming two neighbouring plutons in the Songpan Ganze accretionary orogenic wedge (SW China)(Article)[J]. *Journal of Petrology*, 2017, 58(11):2221-2256.
- [14] 许家斌, 费光春, 覃立业, 等. 四川可尔因矿田李家沟伟晶岩型稀有金属矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(2):346-358.
- XU J B, FEI G C, QIN L Y, et al. Cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb dating and geological significance of Lijiagou Pegmatite-type rare metal deposit in Keelin ore field, Sichuan[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(2):346-358.
- [15] 马圣钊, 王登红, 刘善宝, 等. 综合勘查方法在硬岩型锂矿找矿中的应用——以马尔康稀有金属矿田加达锂矿为例[J]. *地质学报*, 2020, 94(8):2341-2353.
- MA S C, WANG D H, LIU S B, et al. Application of comprehensive exploration method in hard rock lithium ore prospecting-taking Jiada lithium ore field in Marcand as an example[J]. *Acta geologica Sinica*, 2020, 94(8):2341-2353.
- [16] 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992, 20-70.
- XU Z Q, HOU L W, WANG Z X, et al. The orogenic process of Songpan-Ganzi orogenic belt in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992, 20-70.
- [17] 李建康, 王登红, 付小方. 川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代及其构造意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(6):843-848.
- LI J K, WANG D H, FU X F. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and tectonic significance of the rare metal deposit of Koeryin pegmatite type in western Sichuan[J]. *Journal of Geology*, 2006, 80(6):843-848.
- [18] 马圣钊, 王登红, 刘善宝, 等. 川西可尔因锂矿田云母矿物化学及稀有金属成矿和找矿指示[J]. *矿床地质*, 2019, 38(4):877-897.
- MA S C, WANG D H, LIU S B, et al. Mica mineral chemistry and rare metal mineralization and prospecting indicators in the Kelin lithium ore field, western Sichuan[J]. *Deposit Geology*, 2019, 38(4):877-897.
- [19] 赵永久. 松潘-甘孜东部中生代中酸性侵入体的地球化学特征、岩石成因及构造意义[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007, 1-101.
- ZHAO Y J. Geochemical characteristics, petrogenesis and tectonic significance of mesozoic intermediate-acid intrusive bodies in the east of Songpan-Ganzi [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, China Academy of Sciences, 2007, 1-101.
- [20] 岳相元, 杨波, 周雄, 等. 川西地区热达门石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学特征: 岩石成因与构造意义[J]. *现代地质*, 2019, 33(5):1015-1024.
- YUE X Y, YANG B, ZHOU X, et al. Zircon U-Pb age and rock geochemical characteristics of Jedaias quartz diorite in western Sichuan: petrogenesis and tectonic significance[J]. *Modern Geology*, 2019, 33(5):1015-1024.
- [21] 岳相元, 郭佳, 毛树林, 等. 川西太阳河黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(6):142-1151.
- YUE X Y, GUO J, MAO S L, et al. Zircon U-Pb age, rock geochemical characteristics and geological significance of biotite monzonite granite in Taiyanghe, western Sichuan[J]. *Bulletin of Mineral Rock Geochemistry*, 2018, 37(6):142-1151.
- [22] Nie S Y, Yin A, Rowley D B, et al. Exhumation of the Dabie Shan ultra-high- pressure rocks and accumulation of the Songpan-Ganzi flysch sequence, central China[J]. *Geology*, 1994, 22:999-1002.
- [23] Sengor A M C and Natalin B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis [A]. In: Yin A, Harrison T M. , eds. , The Tectonics of Asia [C]. Cambridge University Press, New York, 1996, 486-640.
- [24] Bruguier O, Lancelot J R, Malavieille J. U-Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan-Ganze flysch (Central China): Provenance and tectonic correlations[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1997, 152(1-4):217-231.
- [25] 时章亮, 张宏飞, 蔡宏明. 松潘造山带马尔康强过铝质花岗岩的成因及其构造意义[J]. *地球科学*, 2009, 34(4):569-584.
- SHI Z L, ZHANG H F, CAI H M. Genesis and tectonic significance of Marcand peraluminous granite in Songpan orogenic belt[J]. *Earth Science*, 2009, 34(4):569-584.
- [26] 罗伟, 岳相元, 周雄, 等. 四川金川县列门地区土壤地球化学特征及找矿意义[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):1-7.
- LUO W, YUE X Y, ZHOU X, et al. Soil geochemical characteristics and prospecting significance in Liemen area, Jinchuan County, Sichuan Province[J]. *Mineral Comprehensive Utilization*, 2022(1):1-7.
- [27] 廖运安, 姚学良. 金川—过铝多阶段花岗岩体演化特征及其与成矿关系[J]. *矿物岩石*, 1992, 12(1):12-22.
- LIAO Y A, YAO X L. Evolution characteristics of Jinchuan-peraluminous granite body and its relationship with mineralization[J]. *Minerals and Rocks*, 1992, 12(1):12-22.
- [28] 王全伟, 梁斌, 朱兵, 等. 川西北壤塘地区西康群深海浊积砂岩沉积地球化学特征[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(4):82-85.
- WANG Q W, LIANG B, ZHU B, et al. Sedimentary geochemical characteristics of deep-sea turbidite sandstone of Xikang Group in Zamtang area, northwest Sichuan[J]. *Geology and Geochemistry*, 2001, 29(4):82-85.
- [29] Fei G C, Li B H, Yang J Y, et al. Geology, Fluid inclusion characteristics and H-O-C isotopes of large Lijiegou pegmatite spodumene deposit in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibet: implications for ore genesis[J]. *Resour Geol*, 2018, 68(1):37-50.
- [30] Clayton R N, Mayeda T K. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1963, 27:43-52.
- [31] Coleman M L, Shepherd T J, Durham J J, et al. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis[J]. *Anal Chem*, 1982, 54:993-995.
- [32] Javoy M. Stable isotopes and geothermometry[J]. *J Geol Soc London*, 1977, 133:609-639.

- [33] Coplen T B, Kendall C, Hopple J. Comparison of stable isotope reference samples[J]. *Nature*, 1983, 302:236-238.
- [34] Taylor S R, McLennan S H. The continental crust: its composition and evolution[J]. Oxford:Blackwell, 1985:117-140.
- [35] 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜. 译. 岩石地球化学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000, 206-227.
- YANG X M, YANG X Y, CHEN S X. Rock geochemistry[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2000, 206-227.
- [36] 李培忠, 虞福基, 刘德平, 等. 黑龙江碾子山晶洞碱性花岗岩氢同位素组成与岩浆去气作用 [J]. *地球化学*, 1992(1):70-76.
- LI P Z, YU F J, LIU D P, et al. Hydrogen isotope composition and magma degassing of alkaline granite in Nianzishan, Heilongjiang[J]. *Geochemistry*, 1992(1):70-76.
- [37] 李培忠, 申佑林, 李春岭, 等. 黑龙江碾子山晶洞碱性花岗岩 $\delta^{18}\text{O}$ 等值线图与古化石热水体系研究 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 1990(8):862-869.
- LI P Z, SHEN Y L, LI C L, et al. $\delta^{18}\text{O}$ contour map of alkaline granite in Nianzishan, Heilongjiang Province and study on fossil hot water system[J]. *China Science (Series B)*, 1990 (8):862-869.
- [38] 李培忠, 于津生. 山海关晶洞碱性花岗岩 H、O 同位素地球化学研究 [J]. *科学通报*, 1989(1):51-52.
- LI P Z, YU J S. H and O isotopic geochemistry of alkaline granite in Shanhaiguan geode[J]. *Science Bulletin*, 1989(1):51-52.
- [39] 李培忠. 就“关于碱性花岗岩 H 同位素组成及其有关问题的讨论”有关问题的回答 [J]. *地球化学*, 1995, 24(2): 196-197.
- LI P Z. Answers to some questions about “Discussion on H isotope composition of alkaline granite and related problems” [J]. *Geochemistry*, 1995, 24(2): 196-197.
- [40] 郑永飞, 傅斌, 龚冰. 大别造山带超高压变质岩稳定同位素地球化学 [J]. *安徽地质*, 2000(3):161-165.
- ZHENG Y F, FU B, GONG B. Stable isotope geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Dabie orogenic belt[J]. *Anhui Geology*, 2000(3):161-165.
- [41] 温春齐, 多吉. 矿床学研究方法 [M]. 成都: 四川科技出版社, 2009, 123-136.
- WEN C Q, DUO J. Research methods of mineralogy [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2009, 123-136.
- [42] Hoefs J. Stable isotope geochemistry, 6th revised and updated edition[J]. Springer-Verlag Berlin, 2008:136-150.
- [43] Clark I and Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. New York: Lewis Publishers, 1997: 328.
- [44] Faure G. Principles of isotope Geology [M]. New York: 2nd edn. John Wiley and Sons, 1986: 589.
- [45] 刘家军, 何明勤, 李志明, 等. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义 [J]. *矿床地质*, 2004, 23(1):1-10.
- LIU J J, HE M Q, LI Z M, et al. Carbon and oxygen isotopic composition of silver-copper polymetallic ore concentration area in Baiyangping, Yunnan and its significance[J]. *Geology of Deposits*, 2004, 23(1):1-10.
- [46] 刘建明, 刘家军. 滇黔桂金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式 [J]. *矿物学报*, 1997, 17(4):448-456.
- LIU J M, LIU J J. Basin fluid genetic model of micro disseminated gold deposits in the golden triangle area of Yunnan, Guizhou and Guangxi[J]. *Journal of Minerals*, 1997, 17(4):448-456.
- [47] 毛景文, 赫平, 丁梯平. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据 [J]. *矿床地质*, 2002, 21(2):121-127.
- MAO J W, HE P, DING T P. Carbon, oxygen and hydrogen isotopic evidence of mantle fluid participating in the metallogenic process during the formation of Jiaodong gold deposit[J]. *Deposit Geology*, 2002, 21(2):121-127.

The C-H-O Isotopic Composition and Significance of Spodumene for Redamen Pegmatite Type Rare Metal Deposit in Western Sichuan

Zhang Wei^{1,2}, Zou Lin^{1,2}, Tang Wenchun¹, Huang Jian^{1,2}, Duan Wei^{1,2}, Yang Guibing¹,
Fan Yingwu^{1,2}, Li Xiaosong^{1,2}, Huang Jianguo³

(1.Geochemical Exploration Team of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Deyang, Sichuan, China; 2.Sichuan Shendi Geology Exploration Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, China; 3.School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan, China)

Abstract: The Redamen rare metal deposit is located in the south western part of Keeryin pegmetite typed ore field in western Sichuan. It is a special deposit in the aspects of surrounding rock, element mineralization zoning and distance. The ore with different elevation (3540~3830 m) of the same vein and the same orebody is systematically collected, spodumene single mineral is selected to analyze the C-H-O isotope composition and features of inclusions in different minerals. The inclusions in minerals are mainly liquid-rich inclusions. The salinity of the inclusions in spodumene is 8%~20%, and the homogenization temperature is 180~330℃. The inclusions belong to the ore-forming fluid with medium-low salinity and medium-high temperature. The inclusions in quartz have salinity of 0%~8%, homogenization temperature of 150~240℃,

(下转第 69 页)

Province[R]. Jinzhou: Yangtze University, 2015.5.

[16] ZHU Z M, TAN H Q, LIU Y D, et al. Multiple episodes of mineralization revealed by Re-Os molybdenite geochronology in the Lala Fe-Cu deposit, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(3):311-322.

[17] 唐慧, 刘顺, 钱永超, 等. 四川拉拉铜矿构造变形与成矿

的关系[J]. *矿产综合利用*, 2022(4):87-93.

TANG H, LIU S, QIAN Y C, et al. Relation between structural deformation and mineralization in Lala copper deposit, Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(4):87-93.

Fluid Inclusion Raman Spectrometry and Geological Implications of the Lala Copper Deposit in Sichuan

Li Bo¹, Tang Hui², Luo Liping³, Chen Liang¹, Wu Jin¹

(1.Liangshan Mining Co., Ltd., Huili, Sichuan, China; 2.Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China; 3.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, through the Raman spectroscopy analysis of fluid inclusions in Lala copper deposit, it is found that the types of fluid inclusions are diverse, including not only single pure gas phase or pure liquid phase, gas-rich phase, liquid-rich phase, and many daughter crystals, but also melt-fluid inclusions. The gas phase components of fluid inclusions are not limited to the CO₂, but also include N₂, CH₄ or a mixture of the three. Not only halide daughter crystals but also calcite and hematite daughter crystals are found in fluid inclusion daughter minerals. In conclusion, the Raman spectroscopy characteristics of fluid inclusions show that the ore-forming fluids of the Lala copper deposit have the characteristics of multiple stages and complex sources.

Keywords: Lala copper deposit; Fluid inclusion; Raman spectroscopy

(上接第 54 页)

and belong to low salinity and low temperature fluid. The results of C-H-O isotope test show that the $\delta D/\text{‰}$ of spotamene in the Redamen rare metal deposit ranges from -97.5 to -104.7 (average of -102.8). Compared with the Lijiagou deposit in the southeast of the ore field, the $\delta D/\text{‰}$ of spodumene is obviously smaller, with the $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$ ranging from -0.34 to 2.88 (average of 1.032). However, it is basically consistent with the main metallogenic period of spodumene in Lijiagou deposit, indicating that the ore-forming fluid of late mineralization (that is, the main metallogenic period of spodumene) is mixed with meteoric water. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$ of spodumene in the Redamen rare metal deposit ranges from -10 to -16.6, with an average of -12.7, indicating that the carbon source in the main mineralization period (spodumene formation period) has a mixed nature of magmatic system and meteoric precipitation system, which is related to the low temperature alteration of magmatic mantle source (granite, mantle multi-phase system) and may be mixed with CO₂ generated by the decarboxylation of deposited organic materials. Through the study of mineral C-H-O isotopes and fluid inclusions, the source and evolution process of ore-forming fluids were further clarified.

Keywords: Pegmatite type; Rare metal; Spodumene; C-H-O isotope; Redamen

(上接第 62 页)

alteration zones, and the remote sensing alteration anomaly information could effectively indicate the mineralization location. Based on the comprehensive alteration anomaly information, anomaly verification analysis results and regional geological background, five metallogenic prospects were delineated, which provided reference for further prospecting work in this area.

Keywords: MPT method; Mask technology; Principal component analysis; Threshold classification; Alteration information extraction; Metallogenic prediction