

## 吉林省西岔金银矿床多阶段石英原位组成及地质意义

马敏霞<sup>1</sup>,孙凌云<sup>2\*</sup>,孙金磊<sup>2,3</sup>,赵昌吉<sup>2</sup>,钱 焯<sup>2,4</sup>

(1. 潜江市不动产登记中心; 2. 吉林大学地球科学学院;

3. 中国科学院地球化学研究所; 4. 深部金矿探测大数据应用开发山东省工程研究中心)

**摘要:**西岔金银矿床为早白垩世中温热液脉型,主要产金,伴生银。成矿过程先后经历了热液成矿期和表生成矿期。其中,热液成矿期可划分为3个成矿阶段,每个成矿阶段都发育热液石英。利用LA-ICP-MS原位微区分析技术,对不同成矿阶段石英开展了微量元素组成分析。结果显示,第二阶段为主成矿阶段,矿化最为强烈,是金的主要生成阶段。载金矿物以硫化物为主,但第二阶段Sb、Bi含量显著升高,Au、Ag与Cu、Pb、Zn等金属元素具有正相关关系,说明主成矿阶段的载金矿物可能还有碲化物和铋化物,以微颗粒形式包裹于石英中。基于热液石英Ti含量构建的石英Ti地质温度计显示,热液成矿期成矿温度逐渐降低。石英中Al、Ti、Li含量的规律性变化,表明成矿流体pH逐渐升高,由最初的酸性逐渐向中性、弱碱性演化。

**关键词:**热液石英;LA-ICP-MS;原位微区分析技术;Ti地质温度计;成矿流体;载金矿物

中图分类号:TD11 P618.51

文章编号:1001-1277(2024)06-0065-12

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240614

## 引 言

西岔金银矿床位于华北地台北缘,东临古太平洋板块,北临西伯利亚板块。区域经历了太古宙结晶基底的形成<sup>[1]</sup>,元古宙“辽吉洋”的构造演化<sup>[2]</sup>,中生代遭受古亚洲洋最终闭合的影响,中—新生代又有滨太平洋构造域的叠加与改造<sup>[3-4]</sup>,造就了复杂的构造格局和岩浆活动,为矿产形成奠定了良好的基础,使其成为中国重要的金属成矿带之一。

前人对西岔金银矿床及其周边矿床开展了较多的地质工作,包括矿床地质特征、成矿地质条件、控矿因素、矿化富集规律、围岩蚀变特征和矿床成因等<sup>[5-8]</sup>,但对成矿流体的温压条件、演化过程及成矿物质来源缺乏深入研究。虽然,前人对西岔金银矿床的矿化石英脉进行过流体包裹体等研究工作,但仅针对热液成矿期的某一个阶段进行研究,单一使用成矿流体的完全均一温度估算成矿压力,基于此探讨成矿流体的温压条件具有明显的不足之处<sup>[9]</sup>。而原位微区分析技术从矿物学角度出发,直接测定热液石英中微量元素的含量,通过分析热液成矿期微量元素的分布和变化过程,探讨各阶段成矿流体温度、pH及其在热液成矿期的变化过程,用更加直接的证据来反演热液流体的性质和演化过程。因此,利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)对西岔金银矿

床热液成矿期不同成矿阶段的石英进行原位微区分析,进一步限定成矿温度,探讨成矿流体pH条件及其演化过程,以及导致金卸载沉淀的机制。

## 1 区域地质与矿区地质

西岔金银矿床地处华北地台北缘东段的胶辽吉造山带(见图1),该造山带中生代之前主要受控于古亚洲洋构造体系,中生代之后受古太平洋板块活动的影响,是环太平洋构造带的重要组成部分<sup>[10]</sup>。基底为太古宙高级变质岩系,盖层为古元古宙火山-沉积杂岩系及中生代火山-沉积岩系。受多期构造活动的影响,区域构造十分复杂,主要受到郯庐断裂和天山-阴山构造体系影响,成矿和成岩主要受郯庐断裂控制。区域内中生代以来的岩浆活动主要受郯庐断裂北北东向—北东向剪切性分支断裂控制,成矿作用大多与此相关<sup>[11-12]</sup>。

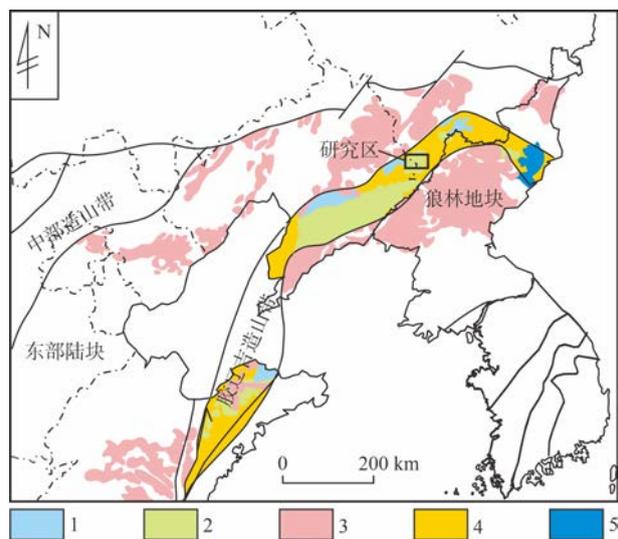
矿区内主要出露集安群地层,该地层是南辽河群地层在吉林省内出露的部分,在通化市、集安市清河镇等地均有分布。集安群地层总体呈北东向展布,向东至朝鲜境内,从下至上依次为蚂蚁河组、荒岔沟组、大东岔组。荒岔沟组(见图2)为矿区主要地层,在西南角少量出露蚂蚁河组地层,二者为不整合接触关系<sup>[13-14]</sup>。前人曾对荒岔沟组的斜长角闪岩进行锆石U-Pb定年,测得其变质年龄为(1 879 ± 15) Ma,

收稿日期:2024-01-05;修回日期:2024-03-25

基金项目:吉林省自然科学基金项目(20220101161JC,20170101201JC);深部金矿探测大数据应用开发山东省研究中心开放课题(SDK202203)

作者简介:马敏霞(1979—),女,工程师,从事自然资源管理与不动产管理工作;E-mail:mmx1232023@163.com

\*通信作者:孙凌云(1999—),女,博士研究生,研究方向为矿产普查与勘探;E-mail:lysun23@mails.jlu.edu.cn



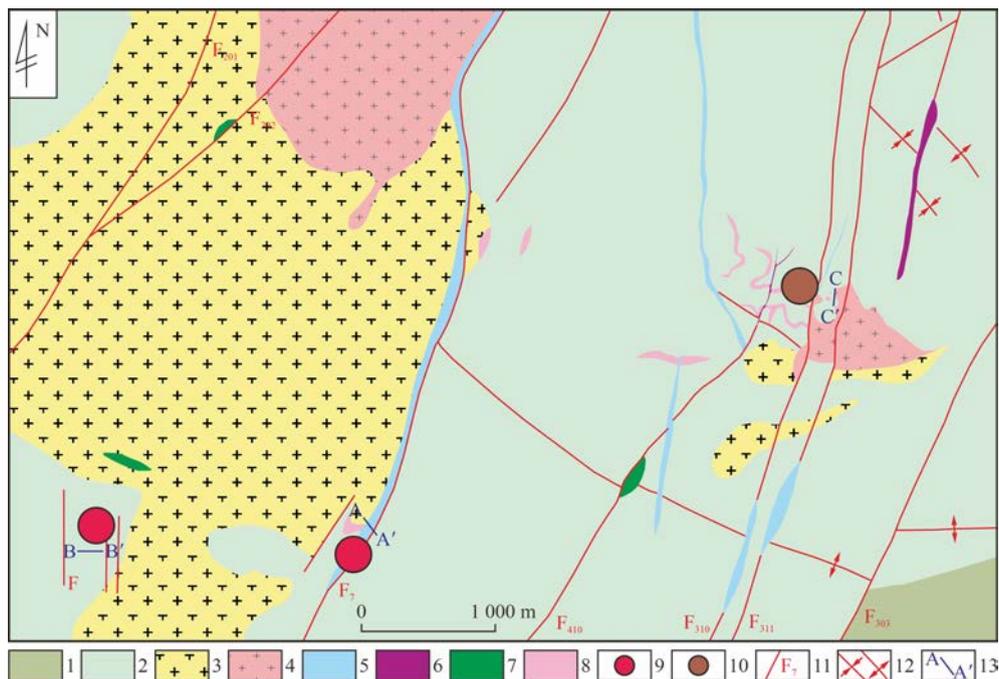
1—北辽河群、老岭群及古元古带花岗岩

2—南辽河群、集安群及古元古带花岗岩

3—出露的太古代基底 4—隐藏的太古代基底 5—摩天岭群

图1 华北地台北缘及邻区元古宙造山带构造简图

Fig. 1 Tectonic sketch of Proterozoic orogenic belt on the north margin of North China Platform and adjacent areas



1—蚂蚁河组 2—荒岔沟组 3—闪长岩 4—斑状花岗岩 5—正长斑岩 6—闪长玢岩

7—辉长岩 8—砂卡岩 9—金矿 10—铅锌矿 11—断裂及编号 12—褶皱 13—勘探线及编号

图2 西岔金银矿区地质图

Fig. 2 Geologic map of Xicha Gold-Silver District

内的3号矿体是西岔金银矿床的代表性矿体,为金银矿体,也是主要矿体,属于半隐伏矿体。3号矿体长约500 m,宽0.2~9 m,最厚7.3 m,最薄0.33 m,平均厚度为2.17 m。矿体倾向 $113^{\circ} \sim 150^{\circ}$ ,倾角 $80^{\circ}$ ,主要呈脉状、豆荚状、扁豆状,常见分支复合与尖灭再现现象。金、银相关系数0.6,金、银平均品位

捕获锆石年龄为 $2471 \sim 2494 \text{ Ma}^{[15]}$ 。荒岔沟组是矿区极其重要的矿源层,Ag、Au、Cu、Pb、Zn等元素含量很高,该地层中上部的石墨大理岩中赋存正岔铅锌矿床<sup>[6]</sup>。蚂蚁河组地层为一套火山-沉积岩系,原岩富含硼<sup>[16-17]</sup>,前人研究认为其变质年龄为 $1864 \sim 1874 \text{ Ma}^{[18]}$ 。

矿区内岩浆活动具有多期多阶段的特点,在印支期早期—燕山期晚期形成了许多岩浆岩体,与围岩均呈侵入接触关系<sup>[9]</sup>。矿区内代表性岩石系列是与“辽吉洋”演化有关的辽吉花岗岩体及辽河群火山-沉积岩系,大面积出露辽吉花岗岩体、正岔岩体( $218.5 \sim 224.3 \text{ Ma}^{[8]}$ )、复兴屯岩体( $221 \sim 227 \text{ Ma}^{[19]}$ ),其中复兴屯岩体与成矿密切相关。矿区内岩脉大部分充填于走向为北北东向的深大断裂中,岩性复杂多样,主要为橄榄玄武岩、辉绿玢岩、闪长玢岩、煌斑岩和正长斑岩( $121.1 \text{ Ma}^{[8]}$ )等。

矿体赋存于北东向 $F_7$ 断裂内或其上下盘与之平行的次级断裂中,长达1200 m,最宽可达100 m。矿体主要为金银矿体,另有少量铅银矿体。位于 $F_7$ 断裂

分别为 $4.18 \text{ g/t}$ 和 $32.58 \text{ g/t}$ ,最高分别可达 $40.24 \text{ g/t}$ 和 $798.30 \text{ g/t}$ ,二者的品位变化系数分别为67%和132%<sup>[19]</sup>。

矿石类型主要为蚀变岩型及少量石英脉型和隐爆角砾岩型。矿石结构主要有他形粒状结构、自形一半自形结构、包含结构、压碎结构、骸晶结构等。矿石

构造有脉状构造、角砾状构造、浸染状构造、团块状构造和条带状构造等。矿石矿物组成比较简单,金属矿物主要有银金矿、黄铁矿、毒砂、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、深红银矿等,载金黄铁矿具有高  $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  值和  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  值<sup>[9]</sup>;非金属矿物主要为石英和方解石。依据矿物的共生组合及矿脉之间的穿插关系,可以将矿床的成矿过程分为2期,即热液成矿期和表生成矿期,热液成矿期又分为3个成矿阶段,分别为石英-黄铁矿-毒砂阶段(第一阶段)、石英-多金属硫化物阶段(第二阶段)和石英-碳酸盐-黄铁矿阶段(第三阶段),其中第二阶段为主成矿阶段<sup>[8]</sup>。

矿体围岩主要有变粒岩、浅粒岩、含石墨大理岩、正长斑岩等。受多阶段的热液成矿作用影响,围岩蚀变强烈,分布于矿体及其上下盘围岩附近,主要围岩蚀变类型有硅化、碳酸盐化、绢云母化和绿泥石化。井下观察和剖面图分析均证实正长斑岩与金银矿化具有密切的时空联系,二者空间上相互依存,共同构成北东向  $F_7$  断裂的主要充填体。同时,正长斑岩局部被矿脉穿切,近矿斑岩有明显的蚀变和矿化,说明其成岩时代稍早于成矿时代,可以用来限定成矿时代。钱焯等<sup>[8]</sup>研究表明,正长斑岩的形成时代为121.1 Ma,将西盆金银矿床的成矿时代限定在早白垩世晚期,认为其形成与古太平洋板块俯冲有关。

结合西盆金银矿床成矿动力学背景、岩浆岩条件、构造条件、矿石矿物组成、围岩蚀变、矿化及成矿流体等方面的特征,认为该矿床成因类型为中温热液脉型<sup>[11]</sup>。

## 2 试验方法

石英在各种地质作用中广泛存在,拥有典型的硅氧四面体结构,很少有元素能够取代晶格中的  $\text{Si}^{4+}$ ,是地球上最纯净的矿物之一。虽然如此,一些元素仍然可以进入石英,尽管多数质量分数可能低于  $1 \times 10^{-6}$ <sup>[20]</sup>。MÜLLER 等<sup>[21]</sup>统计了数千个 LA-ICP-MS 分析数据,发现石英中质量分数大于  $10^{-6}$  的元素通常有 Al、Ti、Na、Ca、K、Li、Fe、Cl、P、B 和 Ge,质量分数在  $10^{-9} \sim 10^{-6}$  的元素有 Pb、Br、Mn、Rb、Sr、Be、Ba、Zn、As、Ce、Cr、Cs、La、Ga、V、Nd、W、I、Co、Th、U、Ta、Ag、Sc、Sm、Dy、Yb、Eu 和 Hg,而质量分数小于  $10^{-9}$  的元素有 Hf、In、Tb、Lu 和 Au。石英作为热液矿床中的主要脉石矿物,其微量元素组成记录着丰富的成矿信息,可以近似代表石英形成时成矿流体的组成<sup>[22]</sup>。基于 LA-ICP-MS 的原位微区分析技术测定热液石英中微量元素,对比微量元素的分布和变化,进而对

不同成矿阶段形成的热液石英进行区分,查明各阶段石英微量元素组成特征。根据相关元素的变化关系,可以探明各阶段成矿流体 pH 变化<sup>[23]</sup>。同时,可以基于微量元素组成,构建石英地质温度计,计算各阶段成矿流体温度,研究其变化过程,进一步限定成矿时所处的温度条件。因此,本文通过原位微区分析技术,探讨成矿过程中流体的温度变化、pH 条件、演化过程,以及导致金卸载沉淀的机制。

石英原位微区分析于自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成。使用玻璃质标样 NIST610、NIST612、GSE-1G、GSD-1G、BCR-2G、BHVO-2G 和 BIR-1G 进行测试,同时与国际上推荐的石英标样进行对比测试<sup>[24]</sup>。试验过程中采用的载气为氦气,通过 T 形三通接口在进入电感耦合等离子体质谱仪前与氩气混合。由于过高的能量密度会导致剥蚀物镜的寿命极大缩短,因此在满足剥蚀要求的前提下,尽可能选择低能量密度进行测试。通过反复试验,将石英和玻璃质标样的最佳剥蚀参数设置为激光能量 100 J,能量密度  $10 \text{ J/cm}^2$ ,脉冲频率 10 Hz。本次测试选择  $60 \mu\text{m}$  束斑作为固定束斑对玻璃质及石英标样进行测试。

## 3 试验结果

### 3.1 微量元素分析结果

本次工作对热液成矿期3个成矿阶段石英开展了基于 LA-ICP-MS 的原位微区分析,结果见表1。由表1可知:各阶段石英的微量元素组成具有规律性变化特征。

第一阶段, Mg、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co 等岩浆元素含量较高,在石英激光剥蚀元素含量代表性曲线上多以峰值出现。第二阶段, Au、Ag 和 Cu、Pb、Zn 等金属元素含量出现峰值,伴生的 Ti、Cd、Mo、Sn、W 等金属元素, Sb、Bi 及高热元素 Th、U 等含量显著增加。第三阶段, Li、Na、Al、Ge、Ba、Hf 等金属元素含量增加, Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等金属元素含量显著下降。此外, S 含量在3个成矿阶段中没有明显变化(见图3)。

前人研究结果表明,石英中 Ti、Al、Li 含量及其相关关系与成矿时热液流体的温度有着密切联系。西盆金银矿床第一阶段 Ti 质量分数为  $1.48 \times 10^{-6} \sim 13.42 \times 10^{-6}$ , Al 质量分数为  $75.40 \times 10^{-6} \sim 370.67 \times 10^{-6}$ , Li 质量分数为  $1.95 \times 10^{-6} \sim 17.05 \times 10^{-6}$ 。第二阶段 Ti 质量分数为  $5.78 \times 10^{-6} \sim 26.82 \times 10^{-6}$ , Al 质量分数为  $39.46 \times 10^{-6} \sim 598.67 \times 10^{-6}$ , Li 质量分数为  $0.31 \times 10^{-6} \sim 4.69 \times 10^{-6}$ 。第三阶段 Ti 质量分数为  $0.92 \times 10^{-6} \sim 3.65 \times 10^{-6}$ , Al 质量分数为  $2\ 022.36 \times$

表1 西岱金矿床多阶段石英基于LA-ICP-MS的原位微区分析结果

10<sup>-6</sup>

Table 1 In-situ micro zone analysis of multi-stage quartz in Xicha Gold-Silver Deposit based on LA-ICP-MS

样品编号	成矿阶段	Li	Na	Mg	Al	SiO <sub>2</sub>	P	S	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As
JA-1-01		11.47	170.63	252.32	270.00	99.42	22.07	607.36	52.66	2 199.33	0.13	3.49	1.47	4.86	17.43	112.49	0	0.08	0.36	0.60	0.07	0.51	0.83
JA-1-02		7.62	93.92	628.09	327.72	98.93	24.81	571.29	13.74	5 001.33	0.22	13.42	3.87	7.45	34.00	439.46	0.02	0.15	0.18	2.05	0.06	0.49	0.71
JA-1-03		4.02	56.60	39.14	91.85	99.84	16.95	550.18	5.68	34.35	0.11	1.97	0.17	4.72	0.09	13.88	0.01	0.05	0.10	0.30	0.01	0.49	0.03
JA-1-04		5.73	105.59	326.95	148.33	99.72	18.46	537.52	36.12	340.92	0.09	3.34	1.72	5.97	3.73	109.36	0.01	0.08	0.01	1.45	0.08	0.32	0.08
JA-1-05		10.85	123.44	218.31	247.07	99.74	19.48	605.53	37.50	105.52	0.15	4.10	0.84	4.39	1.05	82.27	0.02	0.04	0	0.58	0.04	0.54	0.99
JA-1-06		4.94	120.42	213.35	121.58	99.63	19.84	595.03	30.19	1 076.05	0.21	3.48	0.74	2.32	9.01	68.24	0.01	0.01	0.14	0.28	0.02	0.22	0.15
JA-1-07		6.69	107.12	87.84	124.70	99.81	19.81	586.22	11.30	44.66	0.15	2.69	0.08	6.17	0	19.71	0	0	0	0	0	0.23	0
JA-1-08		7.90	89.72	371.80	143.93	99.74	18.06	610.24	17.31	66.08	0.24	3.66	0.65	2.63	0.97	99.33	0.02	0.21	0	7.25	0.02	0.40	0.20
JA-1-09		3.99	127.52	82.66	165.50	99.78	17.41	619.13	54.26	113.45	0.11	3.41	0.43	2.57	1.95	28.82	0	0.06	0.28	3.57	0.01	0.49	0.59
JA-1-10		6.58	120.75	257.60	158.88	99.76	17.20	603.54	27.63	64.04	0.15	2.93	0.88	5.83	0.59	62.54	0.01	0.03	0.17	0.40	0.02	0.39	0.61
JA-1-11		8.38	106.76	67.75	162.78	99.80	16.98	581.82	17.05	41.78	0.18	2.24	0.58	3.67	0.19	64.19	0.01	0.03	0	0.20	0	0.48	0.30
JA-1-12		7.32	180.83	263.97	196.91	99.67	18.82	596.48	51.13	439.50	0.20	3.17	0.52	4.50	7.16	189.43	0.18	0.50	0.16	0.62	0.01	0.45	1.20
JA-1-13		7.73	43.15	6.08	124.21	99.83	20.37	625.60	8.84	36.92	0.13	2.14	0	3.60	0	3.18	0	0.21	0.13	0.18	0	0.25	0.21
JA-1-14	第一阶段	4.74	63.67	67.19	114.57	99.82	18.29	618.43	15.73	30.26	0.09	1.57	0.24	3.20	0.34	29.20	0.01	0.05	0.04	0.50	0	0.24	0.15
JA-1-15		7.68	116.60	87.57	170.08	99.73	313.98	595.86	21.16	40.93	0.13	2.92	1.30	3.18	0.43	41.89	0.01	0	0.13	0.40	0.02	0.27	0.46
JA-1-16		17.05	149.52	124.61	370.67	99.73	19.75	644.70	54.48	27.30	0.14	4.58	0.20	1.85	0.79	32.51	0	0.07	0.11	0.54	0.04	0.41	0.63
JA-1-17		5.88	100.70	449.39	218.82	99.66	20.37	668.02	16.15	275.81	0.13	7.69	2.11	3.78	5.83	172.35	0.01	0.06	0	1.24	0.06	0.40	0.48
JA-1-18		10.31	163.57	228.44	217.98	99.70	13.82	658.08	33.83	320.73	0.18	3.60	0.47	4.77	8.58	100.80	0.03	0	0.26	0.01	0.39	0.55	
JA-1-19		8.93	114.22	216.22	278.60	99.74	17.81	614.74	28.96	48.92	0.13	2.83	3.48	8.35	0.58	111.34	0.02	0.08	0.13	0.64	0.06	0.42	0.13
JA-1-20		2.38	40.58	50.67	75.40	99.84	18.31	569.89	5.25	35.73	0.15	2.84	0.26	5.17	0.03	44.09	0	0	0.08	0	0.02	0.51	0.46
JA-1-21		4.69	84.80	371.66	270.93	99.68	19.75	605.47	16.30	133.24	0.13	4.33	2.32	8.07	2.86	312.26	0.01	0.15	0.02	0.21	0.09	0.40	0.43
JA-1-22		6.43	73.44	306.88	196.39	99.75	19.73	559.81	80.11	49.92	0.22	11.36	1.37	15.15	0.83	121.67	0.02	0.11	0.19	1.80	0.08	0.26	0.37
JA-1-23		1.95	92.76	21.86	176.06	99.81	19.29	563.93	84.76	59.13	0.15	2.19	1.53	16.70	0.78	22.87	0.05	0.07	0	1.04	0.03	0.21	0.48
JA-1-24		4.76	49.18	88.30	110.91	99.82	17.99	584.03	11.19	31.93	0.11	4.37	0.56	3.08	0.34	37.50	0.01	0	0.09	0.03	0.03	0.15	0.29
JA-1-25		4.49	73.66	23.11	92.14	99.84	17.74	569.85	10.65	48.28	0.12	1.48	0.02	1.45	0.28	13.49	0.01	0.02	0	0.41	0	0.61	0.20
JA-1-26		6.28	107.40	15.75	129.24	99.81	18.98	632.16	14.60	43.11	0.10	2.18	0.19	1.06	0.18	21.91	0	0.06	0.03	0.41	0	0.54	0.40
JA-1-27		6.54	52.22	58.93	133.34	99.82	15.81	620.33	12.42	31.77	0.10	2.17	0.18	1.21	0.47	45.85	0.03	0.01	0	0.41	0.01	0.36	0.61
平均值		6.86	101.07	182.46	179.21	99.72	29.70	599.82	28.48	397.81	0.15	3.86	0.97	5.03	3.65	88.91	0.02	0.08	0.08	0.94	0.03	0.39	0.43

表 1(续)  
Table 1 (continued)10<sup>-6</sup>

样品编号	成矿阶段	Li	Na	Mg	Al	SiO <sub>2</sub>	P	S	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Ce	As
JA-2-01		1.14	29.97	11.11	75.92	99.83	32.36	752.10	12.50	92.51	0.12	21.68	0.03	1.03	0.25	3.50	0	0.04	0.27	0	0.02	0.64	0.13
JA-2-02		0.31	23.26	26.56	109.16	99.77	30.31	687.57	43.61	50.46	0.10	26.62	0.07	4.90	1.01	90.54	0	0	52.28	0.27	0.03	0.58	0.20
JA-2-03		1.16	63.75	7.91	102.91	99.82	22.43	618.45	25.24	66.05	0.11	25.10	0	10.07	0.84	51.56	0	0	0.23	0.73	0.03	0.71	0.18
JA-2-04		1.94	60.79	25.02	78.52	99.86	25.74	558.03	15.12	48.53	0.10	25.97	0.01	1.38	2.15	33.06	0	0.04	0.26	0.80	0.01	0.60	0.27
JA-2-05		0.63	47.28	46.29	39.46	99.83	24.28	476.85	10.42	27.47	0.10	20.80	0	1.59	2.15	22.04	0	0.02	0.52	0.80	0	0.76	0.34
JA-2-06		3.20	142.29	4.93	188.40	99.77	25.70	513.24	52.24	199.06	0.33	22.51	0.25	2.67	2.53	37.14	0.01	0.08	0.39	0.48	0.32	0.79	0
JA-2-07		2.71	234.58	5.83	76.86	99.82	23.99	503.15	19.75	105.62	0.78	25.96	0.19	3.43	1.53	17.32	0	0.02	0.14	0.35	3.60	1.05	0
JA-2-08		2.19	86.86	31.23	89.97	99.86	20.53	553.53	18.77	259.24	0.58	23.06	0.90	10.81	4.95	69.19	0.02	0.06	0.53	2.01	5.05	1.98	0
JA-2-09		1.60	83.14	36.84	159.67	99.83	27.35	499.61	34.24	132.35	0.35	24.87	0.84	1.70	0.94	3.99	0.01	0	0	0	13.76	2.59	1.16
JA-2-10		4.69	771.68	14.25	148.46	99.77	28.52	567.53	20.49	1646.97	3.69	24.78	1.62	1.90	10.51	23.07	0	0.61	0.66	8.73	116.60	5.52	4.48
JA-2-11		3.28	264.71	33.70	114.31	99.82	27.36	431.92	26.76	252.66	1.33	25.31	0	1.75	4.77	22.90	0.02	0	0.64	4.37	0	2.33	1.25
JA-2-12		2.65	271.36	20.27	328.50	99.86	23.13	468.53	111.53	186.20	0.89	13.58	0	2.32	0.72	9.67	0.03	0.25	0.20	3.28	4.99	1.81	0.80
JA-2-13		2.54	261.92	7.60	217.51	99.83	19.41	481.98	71.87	183.34	0.51	8.99	0.37	1.89	1.44	13.15	0	0	1.35	1.11	3.04	0.92	1.45
JA-2-14		1.04	132.56	8.45	121.35	99.77	21.98	491.64	26.91	101.49	0.24	9.24	0.29	1.66	2.13	16.67	0	0.02	0.25	0.52	1.80	0.79	0.24
JA-2-15	第二阶段	0.44	142.71	7.03	145.10	99.82	20.64	503.59	48.12	120.71	0.18	7.99	0.47	3.29	4.79	46.82	0	0	0.15	4.28	1.60	0.77	0.38
JA-2-16		1.52	105.01	19.49	211.70	99.86	21.18	523.58	7.55	74.62	0.02	7.48	0.01	1.01	0	2.47	0	0.04	0.31	0.02	0.16	0.24	0.12
JA-2-17		1.84	71.95	21.55	103.19	99.83	19.06	598.14	16.79	52.54	0.08	7.11	0.01	2.06	0.20	3.74	0	0	0	0.11	0.01	0.59	0.29
JA-2-18		1.62	73.26	11.95	116.22	99.77	17.99	598.04	28.37	69.03	0.13	26.82	0.15	1.12	1.88	42.43	0.01	0.05	0.25	0.66	0.03	0.58	0.30
JA-2-19		1.03	60.23	11.22	91.66	99.82	22.04	595.30	18.36	44.67	0.05	5.78	0.01	1.73	0.41	72.18	0.39	0.35	5.51	0.17	0.03	0.57	0.82
JA-2-20		1.21	57.15	4.58	104.13	99.86	14.52	547.07	17.54	58.31	0.10	7.83	0	13.84	0.25	10.46	0	0.12	0.19	0.50	0.05	0.37	0.24
JA-2-21		2.55	188.52	16.60	122.57	99.83	17.53	528.38	33.24	91.01	0.10	6.21	0	4.35	2.07	24.03	0	0	0.40	0.40	0.02	0.52	0.26
JA-2-22		1.27	83.52	24.14	216.70	99.77	20.25	510.56	74.91	52.43	0.12	8.45	0.01	3.55	7.57	80.09	0.01	0.06	0.55	0.50	0.03	0.67	0.75
JA-2-23		0.63	79.51	11.99	463.48	99.82	18.90	571.78	172.60	57.97	0.10	10.55	0.01	1.30	0.42	11.49	0	0.04	0.01	0.04	0.05	0.69	0.19
JA-2-24		1.05	60.24	11.46	96.40	99.86	23.95	587.47	17.26	55.96	0.13	17.21	0.01	0.88	1.11	11.89	0	0.07	0.44	0.19	0.02	0.50	0.14
JA-2-25		0.89	97.28	28.84	283.73	99.83	17.00	532.92	95.86	77.98	0.16	24.50	0.02	2.74	0.79	31.04	0	0.08	0.25	0.28	0.01	0.76	0.16
JA-2-26		0.71	142.10	9.39	138.77	99.77	18.03	583.03	48.65	611.91	0.39	7.80	0.18	2.94	10.26	40.53	0	0.01	0	0.87	0.08	0.38	0
JA-2-27		0.88	64.41	22.36	335.23	99.82	14.04	625.17	139.23	50.37	0.10	6.95	0.22	2.83	1.05	18.44	0	0.02	0.03	0.30	0.14	0.74	0.09
JA-2-28		1.82	104.34	18.68	598.67	99.86	16.49	606.61	192.25	56.65	0.08	6.48	0.03	2.31	2.11	51.73	0	0	0.33	1.27	0.05	0.78	0
JA-2-29		0.71	87.86	8.40	357.95	99.83	16.95	571.90	146.17	63.83	0.07	15.95	0	3.23	1.36	11.51	0	0.02	0.61	0.80	0.02	0.97	0.17
JA-2-30		0.50	228.76	22.32	59.02	99.77	19.61	588.63	22.47	82.31	0.14	24.64	0.01	1.98	5.82	54.69	0	0	4.21	0.68	0.02	0.61	0.18
平均值		1.59	137.37	17.67	176.52	99.82	21.71	555.88	52.30	165.74	0.37	16.34	0.19	3.21	2.53	30.91	0.02	0.07	2.37	1.15	5.05	1.03	0.49

表 1 (续)

Table 1 (continued)

10<sup>-6</sup>

样品编号	成矿阶段	Li	Na	Mg	Al	SiO <sub>2</sub>	P	S	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As
JA-3-01		79.85	249.89	8.91	2 436.55	99.25	22.76	685.24	376.40	275.03	0.16	2.28	0.03	20.63	0.97	25.72	0.01	0.44	0	0.39	0.03	7.03	0.58
JA-3-02		102.05	325.70	13.19	3 019.05	99.19	28.63	595.06	264.67	63.80	0.22	3.65	0.01	0.68	0.08	2.29	0.01	0.11	0.34	0.14	0.04	5.41	0.37
JA-3-03		57.02	266.80	1.70	2 022.36	99.38	27.29	724.50	192.23	38.94	0.11	0.92	0.01	0.88	0.14	0.69	0	0.08	0	0.08	0.02	4.56	0.45
JA-3-04		50.42	276.24	6.59	2 091.00	99.39	31.13	584.93	242.19	54.10	0.17	1.65	0.01	0.12	0	2.02	0	0	0.05	0.09	0	4.28	0.40
JA-3-05		101.50	140.07	1.76	2 069.15	99.41	20.59	619.59	145.62	43.03	0.12	2.04	0	0.42	0.08	1.50	0	0.03	0	0.17	0.01	5.46	0.18
JA-3-06		103.10	235.57	14.98	3 110.45	99.20	25.94	559.02	221.79	60.19	0.16	2.96	0	0.50	0.57	12.08	0	0	0.10	0.20	0	5.51	0.42
JA-3-07		102.19	236.58	2.01	3 178.54	99.20	18.23	489.21	302.30	48.21	0.11	1.64	0	2.88	0.05	1.41	0.01	0	0.07	0.11	0	5.50	0.18
JA-3-08		107.48	201.50	1.28	3 165.84	99.21	19.67	533.77	161.98	39.03	0.06	2.38	0	1.67	0.02	0.98	0	0.01	0	0.22	0	5.61	0.38
JA-3-09		48.26	280.82	8.75	2 297.15	99.34	18.06	584.31	294.71	83.96	0.09	0.96	0.01	1.37	0.22	11.32	0.01	0.01	0.03	0.21	0.01	3.76	0.41
JA-3-10	第三阶段	96.59	276.49	20.48	3 007.54	99.20	19.45	537.64	320.01	87.76	0.09	2.64	0	3.37	0.36	10.48	0	0.08	0.24	0.12	0.02	5.52	0.47
JA-3-11		75.82	457.70	6.79	3 523.46	99.01	17.15	521.63	928.20	117.77	0.09	2.88	0.01	1.88	0.49	7.92	0	0.07	0.30	0.34	0.02	5.31	0.30
JA-3-12		55.94	498.72	12.94	2 906.82	99.13	15.13	615.27	711.51	120.12	0.14	1.27	0	0.49	0.27	8.90	0	0	0.15	0.29	0.06	4.20	0.29
JA-3-13		79.81	392.56	6.95	2 965.32	99.18	19.33	522.32	519.66	68.09	0.08	2.62	0.01	0.72	0.23	5.67	0	0.07	0	0.18	0.05	5.09	0.42
JA-3-14		76.64	285.09	92.30	2 745.33	99.22	20.74	581.45	317.36	77.30	0.11	2.40	0.03	2.13	3.30	145.29	0.01	0	0.18	0.29	0.02	4.91	0.52
JA-3-15		51.61	254.60	67.67	2 306.58	99.30	22.65	566.93	248.35	205.30	0.07	1.62	0.04	13.45	2.08	138.65	0	0.10	0.06	0.25	0.06	3.77	0.18
JA-3-16		51.13	196.10	149.39	2 172.05	99.31	14.99	576.95	233.53	189.88	0.08	1.13	0.04	2.40	2.91	329.03	0.01	0.05	0	0.26	0.06	3.89	0.75
JA-3-17		48.49	296.55	5.02	2 350.90	99.34	16.97	516.50	303.05	100.67	0.15	1.26	0	14.18	0.38	6.16	0.01	0.14	0	0.23	0.03	4.05	0.57
JA-3-18		59.19	340.16	57.35	3 057.12	99.11	19.05	567.29	702.98	122.41	0.13	1.77	0.01	2.68	1.23	124.73	0.01	0.04	0.12	0.45	0.06	5.02	0.37
JA-3-19		56.03	282.26	40.57	2 174.13	99.32	15.85	580.73	369.19	205.48	0.13	2.75	0.01	0.99	6.45	130.24	0	0.07	0.04	0.24	0.02	4.93	0.15
平均值		73.85	289.13	27.30	2 663.12	99.25	20.72	576.96	360.83	105.32	0.12	2.04	0.01	3.76	1.04	50.79	0	0.07	0.09	0.22	0.03	4.94	0.39
样品编号	成矿阶段	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Su	Sb	Ba	Hf	Ta	W	Au	Hg	Bi	Pb	Th	U	
JA-1-01		0.59	10.73	0.22	0.45	0	0	0	0.01	0	0.23	0.69	1.14	0	0	0.01	0	0	0.01	0.49	0	0	
JA-1-02		0.24	18.12	0.40	0.52	0	0.03	0	0.14	0.01	0.10	0.30	0.61	0	0	0.04	0	0	0.01	0.29	0	0.01	
JA-1-03		0.13	1.05	0	0.25	0	0.01	0	0.08	0	0.12	0.10	0.44	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	
JA-1-04		0.66	3.02	0.03	0.33	0.01	0	0.01	0.20	0.01	0.14	0.10	0.81	0.01	0	0	0	0	0.02	1.06	0	0.24	
JA-1-05		0.47	2.32	0	0.06	0	0	0.01	0.04	0	0.10	0.78	0.65	0.01	0	0	0	0	0.01	0.66	0	0	
JA-1-06	第一阶段	0.47	5.00	0.04	0.22	0	0.03	0.01	0.10	0.01	0.07	0.19	0.52	0	0	0	0	0	0.01	0.07	0	0	
JA-1-07		0.32	1.94	0	0.79	0	0.01	0.01	0.10	0	0.23	0.20	0.54	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0.18	0	0	
JA-1-08		0.23	0.86	0	0.30	0	0.02	0	0	0	0.32	0.24	0.47	0.01	0	0	0	0	0.01	0.17	0	0	
JA-1-09		0.50	3.38	0	1.02	0	0	0	0.07	0	0.21	0.11	0.80	0.01	0	0	0	0	0	0.43	0	0	
JA-1-10		0.37	2.73	0	0.71	0	0.09	0.07	0.05	0.01	0.20	0.39	0.64	0.03	0	0	0	0	0.01	0.08	0	0	
JA-1-11		0.21	1.88	0	0.20	0	0.01	0	0.04	0	0.19	0.37	0.35	0.01	0	0	0	0	0.01	0.10	0	0	
JA-1-12		0.67	6.81	0.05	2.18	0	0	0.02	0.06	0.01	12.45	0.64	0.91	0	0	0	0	0	0.02	0.50	0	0	

表1(续)

Table 1 (continued)

10<sup>-6</sup>

样品编号	成矿阶段	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Ba	Hf	Ta	W	Au	Hg	Bi	Pb	Th	U
JA-1-13		0.08	2.34	0	0.50	0	0	0.01	0	0	0.09	0.10	0.28	0	0	0	0	0	0	0.06	0	0
JA-1-14		0.28	1.75	0.01	0.28	0	0.01	0.01	0.03	0	0.08	0.17	0.45	0	0	0.01	0	0	0.01	0.31	0	0
JA-1-15		0.29	1.96	0	0.93	0.03	0.01	0.16	0.25	0.87	0.17	0.19	0.32	0.01	0	0	0	0	0.01	0.10	0	0
JA-1-16		0.33	1.73	0	0.45	0	0	0.01	0.16	0.01	0.09	0.89	0.67	0.01	0	0	0	0	0	0.32	0	0
JA-1-17		0.25	5.32	0.01	0.20	0	0	0	0	0	0.16	0.22	0.50	0	0	0.03	0	0	0.01	0.15	0	0
JA-1-18		0.34	8.27	0	0.45	0	0	0	0	0	0.12	0.47	0.63	0	0	0	0	0	0.01	0.04	0	0
JA-1-19	第一阶段	0.36	4.16	0.01	0.49	0	0.01	0.01	0.23	0	0.16	0.24	0.51	0.01	0	0	0	0	0.01	0.03	0	0
JA-1-20		0.08	1.47	0	0.21	0	0.01	0	0.15	0	0.20	0.03	0.25	0.01	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0
JA-1-21		0.19	2.35	0.05	0.77	0	0.06	0	0.13	0	0.21	0.34	0.52	0	0	0.03	0	0	0.01	0.14	0	0
JA-1-22		1.25	1.49	0	0.34	0	1.23	0	0.10	0	0.28	0.27	0.71	0.01	0	0	0.05	0	0.01	0.37	0	0
JA-1-23		1.15	1.98	0.01	0.50	0	0.03	0.02	0	0.01	0.15	0.17	1.06	0.01	0	0	0	0	0.01	0.64	0	0
JA-1-24		0.22	0.85	0	0.43	0	0.01	0	0	0	0.11	0.09	0.34	0.01	0	0	0	0	0.01	0.10	0	0
JA-1-25		0.14	1.11	0	0.38	0	0.02	0.02	0.06	0	0.28	0.03	0.49	0.01	0	0.01	0	0	0	0.30	0	0
JA-1-26		0.24	1.58	0	0.36	0	0	0	0.04	0	0.09	0.09	0.59	0	0	0	0	0	0.01	0.04	0	0
JA-1-27		0.25	0.72	0	0.19	0	0	0.01	0.02	0	0.08	0.23	0.32	0	0	0	0	0	0.01	0.09	0	0
平均值		0.38	3.52	0.03	0.50	0	0.06	0.01	0.08	0.04	0.62	0.28	0.57	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0.25	0	0.01
JA-2-01		0.05	1.06	0.02	0.15	0	0.02	0	0.09	0	0.17	0	0.94	0	0	0	0	0	0.01	0.12	0	0
JA-2-02		0.18	0.83	0.40	0.21	0	0.01	0.07	0	0.03	0.15	0.04	2.42	0	0	0.01	0	0	0	0.42	0.01	0.02
JA-2-03		0.13	0.49	0.14	0.28	0	0.03	0	0.06	0.01	0.13	0.10	1.95	0.01	0	0.02	0	0	0.01	0.48	0	0
JA-2-04		0.18	0.83	0.01	0.28	0	0.10	0.03	0.19	0	0.26	0.16	6.06	0.06	0	0.03	0	0	0	0.37	0.02	0
JA-2-05		0.09	0.10	0.08	0.28	0	0.03	0	0.16	0	0.13	0.06	1.18	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0.71	0	0
JA-2-06		0.44	1.21	1.51	2.04	0	0.20	0	0	0.21	0.68	0.46	3.19	2.62	0	0.31	0	0	0.61	0.72	0	0.01
JA-2-07		0.55	2.41	0.12	0.76	0	0.23	0.01	0	1.56	1.14	0.11	3.30	1.97	0	0	0.01	0	0.26	0.32	0	0.90
JA-2-08		0.30	1.35	2.62	0.89	0.01	0.39	0.12	1.24	7.01	1.18	1.87	2.29	0.86	0	2.59	0.02	0	1.00	1.63	0.09	6.02
JA-2-09	第二阶段	0.43	1.37	24.27	1.36	0	0.54	0.04	1.72	0	1.78	0.83	2.28	3.75	0	133.74	0.04	0	2.59	0.99	0.02	1.38
JA-2-10		1.84	8.35	4.50	1.12	0	0.51	0.06	2.95	2.04	2.57	0.86	3.07	10.93	0	0	0.14	0	6.41	4.55	0	10.74
JA-2-11		0.52	1.83	2.74	0.80	0	2.35	0.72	1.65	3.68	1.19	3.49	4.72	3.30	0	1.92	0	0	0.42	2.30	0.01	1.88
JA-2-12		0.85	3.03	1.64	1.38	0	0.76	0.48	0.74	1.73	1.07	3.46	5.77	3.40	0	9.04	0	0	5.94	2.27	0.13	1.88
JA-2-13		0.62	2.14	0.23	0.18	0	0	0.10	1.38	0	0.89	0.73	4.35	0	0	0	0	0	0.79	0.91	0	0.60
JA-2-14		0.46	1.31	0.32	0.30	0	0	0	0.73	0.31	0.65	0.08	2.01	0	0	0	0.02	0	0	0.91	0	0.28
JA-2-15		0.43	1.58	0.41	0.16	0	0.05	0.02	0.33	0.34	0.54	0.11	3.58	0.22	0	0.23	0	0	0.40	1.75	0	0.08
JA-2-16		0.08	0.76	0	0.24	0	0.06	0	0.16	0	0.25	0.01	0.37	0.01	0	0	0	0	0.02	0.11	0	0
JA-2-17		0.07	1.05	0.02	0.15	0	0.01	0.02	0.07	0	0.13	0.05	2.85	0.01	0	0	0.01	0	0.01	0.22	0	0

表 1 (续)

Table 1 (continued)

10<sup>-6</sup>

样品编号	成矿阶段	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Ba	Hf	Ta	W	Au	Hg	Bi	Pb	Th	U
JA-2-18		0.18	0.52	0.02	1.75	0	0.05	0.03	0.16	0.01	0.10	0.07	2.67	0.01	0	0.01	0	0	0.02	0.87	0.01	0.01
JA-2-19		0.14	1.15	0	0.25	0	0.04	0.43	0.15	0	0.02	0.09	1.91	0	0	0	0	0	0.03	0.83	0	0
JA-2-20		0.06	0.49	0	0.09	0	0.02	0	0	0	0.21	0.03	0.47	0	0	0	0	0	0.02	1.38	0	0
JA-2-21		0.50	1.36	0.02	0.38	0.01	0.08	0.07	0.09	0	0.29	0.08	2.97	0.01	0	0	0	0	0.01	0.27	0	0.01
JA-2-22		0.34	1.01	0.01	0.44	0	0.02	0.03	0.19	0	0.32	0.10	1.83	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0.51	0	0
JA-2-23		0.42	2.17	0.02	0.40	0	0.02	0	0.09	0	0.18	0.13	3.90	0	0	0.01	0	0	0.01	0.14	0.01	0.01
JA-2-24	第二阶段	0.13	0.59	0.02	0.62	0	0.03	0	0.09	0	0.14	0.04	1.72	0.01	0	0	0	0	0.01	0.13	0	0
JA-2-25		0.40	1.43	0.02	0.46	0.09	0.05	0	0.06	0	0.09	0.06	3.66	0.18	0	0.02	0	0	0.01	0.48	0.01	0
JA-2-26		0.33	1.89	4.70	5.48	0	0.04	0.02	0	0.02	0.31	0.07	3.27	0.18	0.01	0.04	0	0	0.02	0.58	0.01	0.03
JA-2-27		0.54	0.88	0.03	0.12	0	0.01	0.01	0.05	0	0.26	0.02	1.97	0	0	0.01	0	0	0	0.27	0.02	0.01
JA-2-28		0.49	2.62	0.01	0.23	0	0	0.02	0.14	0.01	0.25	0.23	7.62	0.01	0	0	0	0.01	0.45	0	0	0
JA-2-29		0.50	1.96	0.03	0.33	0	0.01	0.02	0.13	0	0.16	0.14	7.17	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0.88	0	0
JA-2-30		0.27	1.17	0.08	0.43	0	0.03	0.09	0	0.02	0.34	0.12	7.50	0.04	0	0	0	0	0.03	1.12	0	0
平均值		0.38	1.56	1.47	0.72	0	0.19	0.08	0.42	0.57	0.72	0.45	3.23	0.92	0	4.93	0.01	0	0.62	0.89	0.01	0.80
JA-3-01		0.83	6.22	0	0	0	0	0.01	0.41	0	0.24	1.65	5.54	0	0	0	0	0	0.03	0.15	0	0
JA-3-02		0.46	3.64	0	0	0	0.05	0.07	0.26	0	0.17	3.20	3.81	0.03	0	0	0	0	0.03	0.12	0	0
JA-3-03		0.71	4.68	0	0	0	0.01	0.01	0.07	0	0.29	2.76	19.47	0.01	0	0	0	0	0.02	0.03	0	0
JA-3-04		0.99	6.42	0	0	0	0	0.04	0.12	0	0.09	2.88	27.66	0	0	0	0	0	0.02	0.17	0	0
JA-3-05		0.31	2.67	0	0	0	0.01	0.03	0.12	0	0.16	0.60	2.69	0.01	0	0	0	0	0.01	0.06	0	0
JA-3-06		0.47	4.17	0	0	0	0	0.05	0.14	0	0.15	2.58	8.04	0.02	0	0.01	0	0	0.01	0.04	0	0
JA-3-07		0.55	3.69	0	0	0	0	0.02	0.14	0	0.25	1.77	7.69	0.01	0	0	0.01	0	0.02	0.09	0	0
JA-3-08		0.25	1.87	0	0	0	0	0.01	0.20	0	0.18	2.23	4.64	0.01	0	0	0	0	0.01	0.12	0	0
JA-3-09		1.20	7.00	0	0	0	0.02	0.01	0.03	0	0.27	1.96	21.10	0	0	0	0	0	0	0.09	0	0
JA-3-10	第三阶段	0.76	6.62	0	0	0	0.01	0.05	0.13	0	0.27	2.31	9.07	0	0	0	0	0.03	0.07	0	0	0
JA-3-11		1.79	14.16	0	0	0	0.01	0.13	0.09	0	0.15	2.11	25.00	0.02	0	0	0	0.01	0.09	0	0	0
JA-3-12		1.81	14.96	0	0	0	0.02	0.16	0.09	0	0.16	2.81	42.38	0	0	0	0	0	0	0.11	0.01	0.03
JA-3-13		1.21	7.72	0	0	0	0.01	0.10	0.18	0	0.24	2.99	17.23	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0.07	0	0
JA-3-14		1.02	6.72	0.01	0	0	0	0.04	0.08	0	0.31	3.52	18.99	0	0	0	0	0	0.01	0.08	0	0
JA-3-15		1.11	7.06	0.03	0	0	0	0.02	0.05	0.01	0.22	2.41	25.01	0	0	0	0	0.01	0.15	0	0	0
JA-3-16		0.86	5.38	0.01	0	0	0	0.02	0.06	0	0.21	2.38	13.00	0.01	0	0	0	0.01	0.25	0	0	0
JA-3-17		1.09	7.08	0	0	0	0.01	0.02	0.07	0	0.24	2.02	21.67	0.01	0	0	0	0.01	0.16	0	0	0
JA-3-18		2.28	9.90	0.01	0	0	0.01	0.06	0.07	0	0.21	1.90	16.50	0	0	0.01	0	0	0.01	0.11	0	0
JA-3-19		0.90	9.52	0.02	0	0	0.01	0.07	0.05	0	0.27	1.31	15.79	0	0	0.04	0	0	0	0.17	0	0
平均值		0.98	6.81	0.01	0	0	0.01	0.05	0.12	0	0.21	2.28	16.07	0.01	0	0	0	0.01	0.11	0	0	0

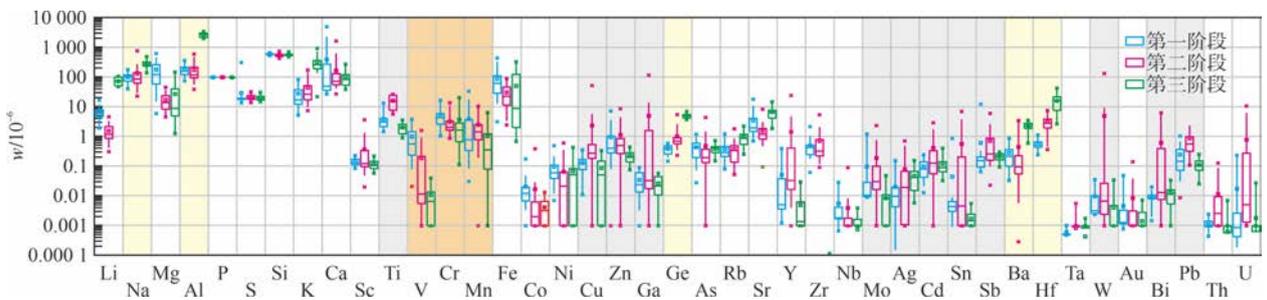


图3 西岔金银矿床各阶段石英中微量元素含量对比图

Fig. 3 Comparison of micro element contents in quartz at each stage of Xicha Gold-Silver Deposit

$10^{-6} \sim 3\,523.46 \times 10^{-6}$ , Li 质量分数为  $48.26 \times 10^{-6} \sim 107.48 \times 10^{-6}$ 。热液成矿期 Ti 含量逐渐降

低,与 Al 含量呈负相关关系;而 Li 含量逐渐升高,与 Al 含量呈正相关关系(见图4)。

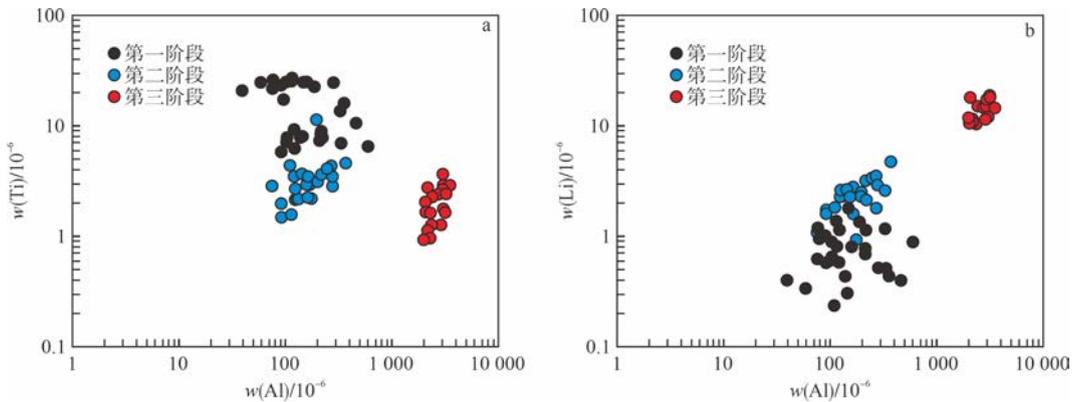


图4 西岔金银矿床热液石英中 Al 与 Ti、Li 协变图

Fig. 4 Covariance diagram of hydrothermal quartz Al vs. Ti and Li in Xicha Gold-Silver Deposit

### 3.2 石英 Ti 地质温度计

近年来研究结果表明,石英中 Ti 含量与石英沉淀温度具有广泛的相关关系,石英中 Ti 含量越高,则形成温度越高。因此,可以通过构建石英 Ti 地质温度计(TitaniQ)来研究石英沉淀时的温度条件。如果石英为热液石英,则其沉淀温度可以用来反映成矿温度<sup>[25-26]</sup>。

构建石英 Ti 地质温度计的基础依据是石英中的类质同象置换关系( $\text{Ti}^{4+} - \text{Si}^{4+}$ ),温度( $T$ )表达式为:

$$T = \frac{-3\,765}{\left[ \lg\left(\frac{w_{\text{Ti}}}{a_{\text{TiO}_2}}\right) - 5.69 \right]} - 273 \quad (1)$$

式中: $w_{\text{Ti}}$ 为石英中 Ti 质量分数( $10^{-6}$ ); $a_{\text{TiO}_2}$ 为石英中  $\text{TiO}_2$  相对金红石的活度(金红石的活度为 1)<sup>[27]</sup>。

使用石英 Ti 地质温度计时,往往要求体系中 Ti 达到饱和,通常以金红石的出现作为指示。但是,如果研究体系中  $\text{TiO}_2$  的活度是已知的,即使没有金红石出现,也可以使用石英 Ti 地质温度计。只要对体系中  $\text{TiO}_2$  活度进行合理估计,计算误差是很小的。前人研究结果表明,在使用相同的石英 Ti 地质温度计进行计算时,温度越高则误差越大。对于形成温度低于  $700\text{ }^\circ\text{C}$  的岩石,当  $a_{\text{TiO}_2}$  误差为  $\pm 0.2$  时,计算温

度的误差为  $-30\text{ }^\circ\text{C} \sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ;当  $a_{\text{TiO}_2}$  误差为  $\pm 0.1$  时,计算温度的误差不会超过  $20\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[27]</sup>。

本文石英中  $\text{TiO}_2$  活度使用推荐值 0.8,粗略计算石英形成温度<sup>[27]</sup>。将西岔金银矿床热液成矿期的 3 个成矿阶段石英中 Ti 含量代入式(1),结果见表 2。由表 2 可知:第一阶段温度为  $506\text{ }^\circ\text{C} \sim 631\text{ }^\circ\text{C}$ ,第二阶段温度为  $421\text{ }^\circ\text{C} \sim 570\text{ }^\circ\text{C}$ ,第三阶段温度为  $395\text{ }^\circ\text{C} \sim 475\text{ }^\circ\text{C}$ ,3 个成矿阶段温度依次降低(见图 5)。

表2 石英 Ti 地质温度计计算结果

Table 2 Calculated results of quartz Ti with geothermometer

成矿阶段	$w(\text{Ti})/10^{-6}$	温度/ $^\circ\text{C}$
第一阶段	5.78 ~ 26.82	506 ~ 631
第二阶段	1.48 ~ 13.42	421 ~ 570
第三阶段	0.82 ~ 3.65	395 ~ 475

## 4 讨论

### 4.1 各阶段石英变化特征

第一阶段岩浆元素含量较高,流体特征更接近岩浆。在第一阶段石英激光剥蚀图解(见图 6)中, Mg、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co 等金属元素多以峰值出现,有可

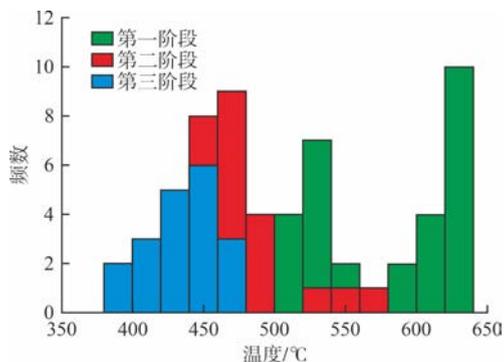


图5 西岔金银矿床石英温度直方图

Fig. 5 Temperatures histogram of quartz in Xicha Gold - Silver Deposit

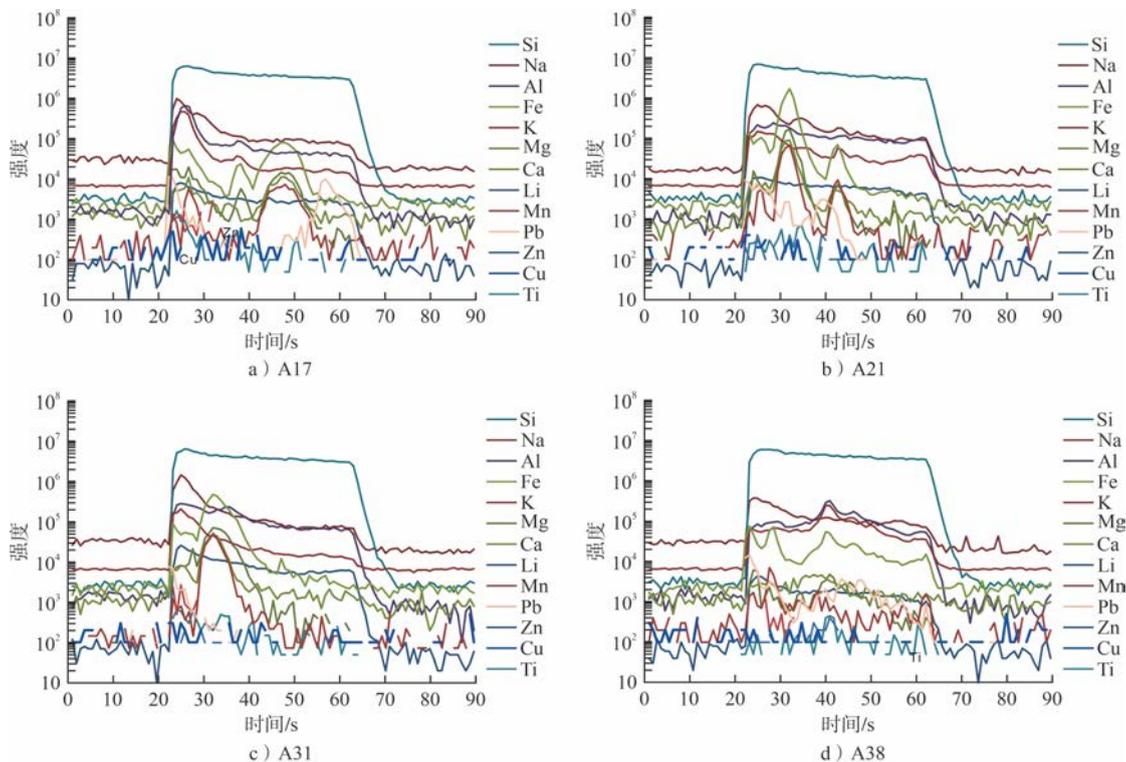


图6 第一阶段石英激光剥蚀图解

Fig. 6 Diagram of quartz laser stripping in the first stage

第三阶段石英激光剥蚀图解见图8。由图8可知:第三阶段剥蚀曲线多以平坦曲线为主,贱金属元素含量显著下降,表明经历了第二阶段金属元素大量卸载后,第三阶段成矿物质含量大幅降低,为成矿后阶段。这一阶段Li、Na、Al、Ge、Ba、Hf等微量元素显著增加,可能与碳酸盐系统的加入有关,这与野外观测结果一致。

#### 4.2 成矿流体

前人研究认为,石英中Ti含量与温度呈正相关关系<sup>[31]</sup>。西岔金银矿床热液成矿期从早到晚,Ti含量逐渐降低,暗示成矿流体温度逐渐降低。石英Ti地质温度计研究结果表明,从第一阶段到第三阶段,流体温度逐渐降低。从第一阶段到第三阶段,

能以类岩浆包裹体的形式出现在第一阶段的石英中,表明西岔金银矿床成矿流体在初始演化阶段以岩浆流体为主。

第二阶段许多金属元素含量显著增加,高热元素Th、U出现峰值,表明该阶段为西岔金银矿床的主成矿阶段。由于S含量没有明显变化,而Sb、Bi含量增加,与Au含量呈正相关关系,说明载金矿物除硫化物外,可能还有碲化物和铋化物<sup>[28-29]</sup>。Au、Ag与Cu、Pb、Zn等金属元素基本呈正相关关系,第二阶段石英激光剥蚀图解(见图7)中,剥蚀曲线呈明显的金属峰,与其他阶段的石英明显不同,表明主成矿阶段大量成矿物质以微颗粒形式包裹于石英中<sup>[30]</sup>。

Al含量与Ti含量呈负相关关系,而与Li含量呈正相关关系(见图4),这种微量元素的变化关系与世界上大多数热液型、岩浆型矿床一致,是在岩浆-热液演化过程中大气降水加入导致温度降低的结果。3个成矿阶段石英中微量元素的规律性变化也表明热液流体由最初的酸性向中性及弱碱性演变的过程,指示在成矿过程中可能有外界流体的加入及水岩反应的发生,这与主成矿阶段大量CH<sub>4</sub>包裹体的存在一致,即成矿物质的带入和卸载与碳质流体的加入密切相关。

## 5 结论

1) 西岔金银矿床热液成矿期第二阶段(石英 -

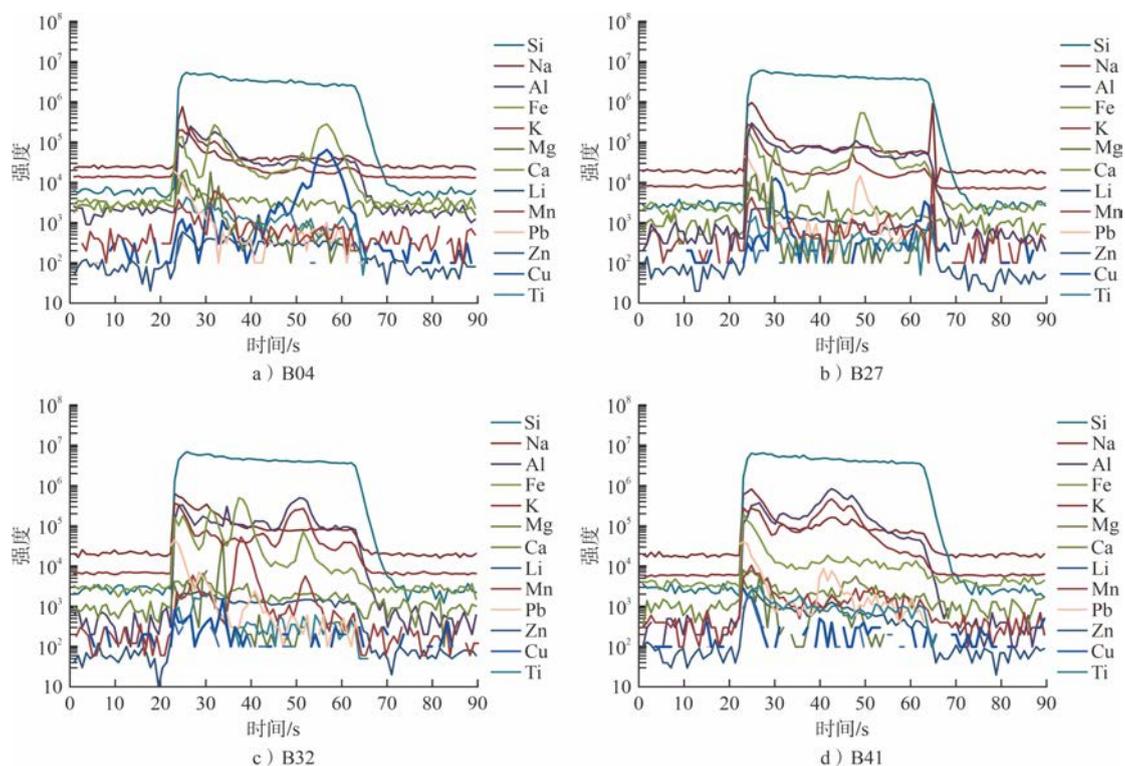


图7 第二阶段石英激光剥蚀图解

Fig.7 Diagram of quartz laser stripping in the second stage

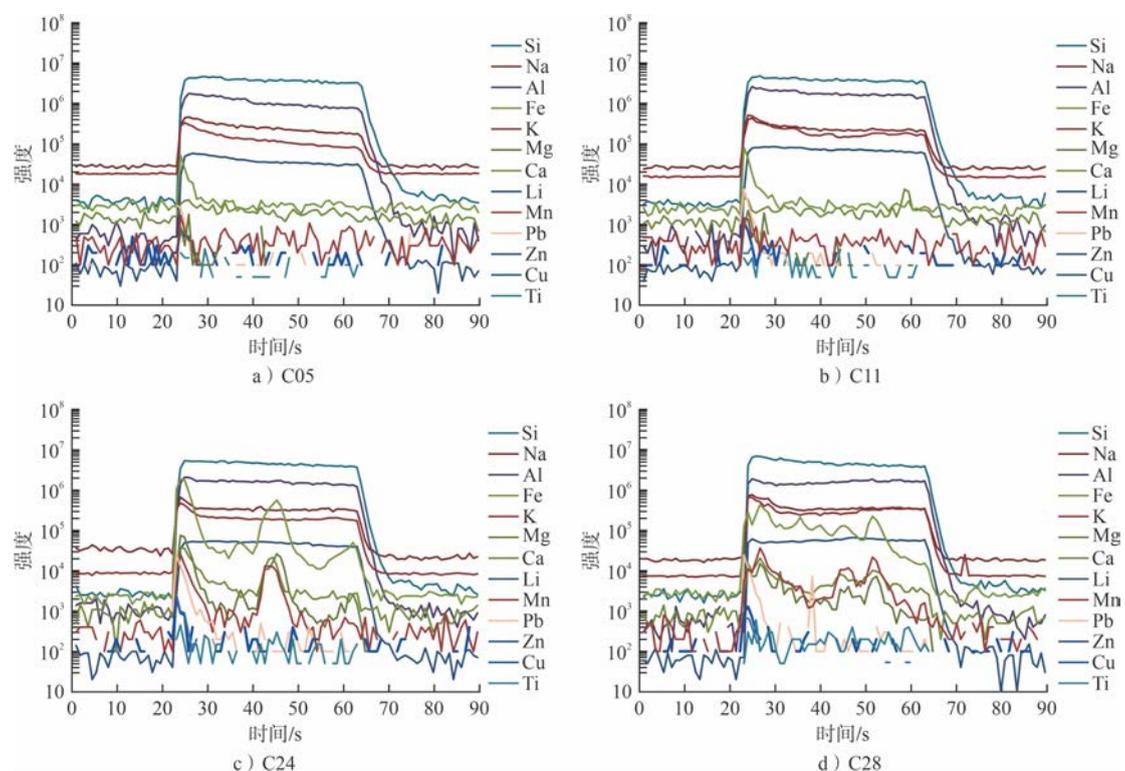


图8 第三阶段石英激光剥蚀图解

Fig.8 Diagram of quartz laser stripping in the third stage

多金属硫化物阶段)为主成矿阶段,大量成矿物质在这一阶段沉淀,金大量富集。微量元素分析结果显示,第二阶段载金矿物除硫化物外,可能还有碲化物和铋化物,且成矿物质的卸载可能以微颗粒形式包裹

于石英中。

2)西岔金银矿床热液成矿期的3个成矿阶段从早到晚成矿流体温度逐渐降低,成矿流体由最初的酸性向中性、弱碱性演化。第一阶段,成矿流体以岩浆

流体为主,温度较高。第二阶段,流体上侵导致温度降低、压力下降,发生不混溶作用,形成多种硫化物,金、银络合物稳定性被破坏,形成大量沉淀。第三阶段,矿化作用微弱,大气水及碳酸盐系统等开始加入流体,流体中碱性元素增加,温度进一步降低,pH增高。

#### [参考文献]

[1] LIU D Y, NUTMAN A P, COMPSTON W, et al. Remnants of  $\geq 3$  800 Ma crust in the Chinese part of the Sino - Korean craton [J]. *Geology*, 1992, 20(4): 339 - 342.

[2] 彭勃. 吉林东南部那尔轰-天合兴地区及邻区铜成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.

[3] 徐备, 鲍庆中, 等. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探[J]. *岩石学报*, 2014, 30(7): 1 841 - 1 857.

[4] 唐杰, 许文良, 王枫, 等. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代 - 古近纪岩浆记录[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(5): 549 - 583.

[5] 朱聪. 吉林省集安西盆地矿床成矿条件与成矿预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.

[6] 彭明生, 赵华伟, 杨宏智, 等. 吉林老岭地区正岔夕卡岩型铅锌矿床成因与找矿标志[J]. *地质与资源*, 2013, 22(3): 185 - 191.

[7] 赵华伟, 臧兴运, 宋爽, 等. 集安正岔铅锌矿床成因讨论[J]. *吉林地质*, 2018, 37(2): 52 - 55.

[8] 钱焯, 孙金磊, 李予晋, 等. 华北地台北缘西岔地区金多金属矿床成矿地质体年代学、地球化学及成矿动力学[J]. *岩石学报*, 2020, 36(4): 1 127 - 1 150.

[9] 王键. 吉林省西岔金银矿床矿化富集规律及成因研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

[10] 段雪鹏, 田永飞, 王宁, 等. 辽东地区大石湖沟铜矿化构造背景——来自闪长玢岩锆石成因的指示[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(1): 140 - 160.

[11] 孙金磊. 吉林省西岔金银矿床地质特征及其成因[D]. 长春: 吉林大学, 2021.

[12] 常翔, 孙景贵, 陈旭, 等. 吉林省南部集安大石湖 - 大台子铜矿化区中生代中酸性杂岩岩石成因与地球动力学背景[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(3): 920 - 945.

[13] 冯志刚, 梁延平. 吉林省通化市白家街金矿区化探异常特征及找矿前景分析[J]. *黄金*, 2018, 39(10): 17 - 21.

[14] 张天旭, 王力, 陈晓航, 等. 吉林白山荒沟山金矿床流体包裹体特征及其地质意义[J]. *黄金*, 2020, 41(6): 14 - 20.

[15] 秦亚, 陈丹丹, 梁一鸿, 等. 吉林南部通化地区集安群的年代学[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(11): 1 587 - 1 599.

[16] 王福润. 吉林省南部下元古界集安群地质特征与沉积期古环境分析[J]. *吉林地质*, 1991(2): 31 - 41.

[17] 刘福来, 刘平华, 王舫, 等. 胶 - 辽 - 吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. *岩石学报*, 2015, 31(10): 2 816 - 2 846.

[18] 王惠初, 陆松年, 初航, 等. 辽阳河栏地区辽河群中变质基性熔岩的锆石 U - Pb 年龄与形成构造背景[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(5): 1 322 - 1 334, 1 361.

[19] 王键, 李碧乐, 孙丰月. 吉南集安金厂沟金矿区晚三叠世黑云母闪长岩和正长花岗岩的年龄、岩石成因及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(5): 1 092 - 1 106.

[20] GOETTE T, PETTKE T, RAMSEYER K, et al. Cathodoluminescence properties and trace element signature of hydrothermal quartz: A fingerprint of growth dynamics [J]. *American Mineralogist*, 2011, 96(5/6): 802 - 813.

[21] MÜLLER A, WIEDENBECK M, VAN DEN KERKHOFF A M, et al. Trace elements in quartz—A combined electron microprobe, secondary ion mass spectrometry, laser-ablation ICP - MS, and cathodoluminescence study [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2003, 15(4): 747 - 763.

[22] ZHANG Y M, GU X X, YAO S Y, et al. Magmatic to hydrothermal evolution of the Gaogangshan Mo Deposit, NE China; Mineralogical insights from quartz [J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 156: 105388.

[23] 丁坤, 王瑞廷, 钱壮志, 等. 陕西省陈家坝铜铅锌多金属矿床地质地球化学特征及矿床成因探讨[J]. *地质与勘探*, 2017, 53(3): 436 - 444.

[24] AUDETAT A, GARBE-SCHOENBERG D, KRONZ A, et al. Characterisation of a natural quartz crystal as a reference material for micro-analytical determination of Ti, Al, Li, Fe, Mn, Ga and Ge [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2015, 39(2): 171 - 184.

[25] CAVALCANTE C, COSTA D J J, LAGOEIRO L, et al. Titanium Q temperatures and textural analysis as a record of the deformation history in a major continental shear zone system, Borborema Province, Brazil [J]. *Tectonophysics*, 2022, 841(12): 229548.

[26] TUTTLE L, HENRY D J. Metamorphic P - T paths of archaic granulite facies metasedimentary lithologies from the eastern beartooth mountains of the northern wyoming province, montana, USA: Constraints from quartz-in-garnet (QuiG) raman elastic barometry, geothermobarometry, and thermodynamic modeling [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2023, 35(4): 499 - 522.

[27] WARK D A, WATSON E B. Titanium Q: A titanium-in-quartz geothermometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152(6): 743 - 754.

[28] 郝建瑞, 王义天, 刘俊辰, 等. 小秦岭金矿田桐沟金矿床黄铁矿微量元素组成及其成因意义[J]. *黄金*, 2021, 42(8): 8 - 16.

[29] 黄式庭, 于晓飞, 吕志成, 等. 甘肃北山老金厂金矿床载金矿物特征、原位硫同位素组成及其对成矿的指示意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(5): 1 387 - 1 403.

[30] 阿卜杜萨拉木·喀迪尔, 陆继龙, 范玉超, 等. 胶东地区笏山金矿床黄铁矿微量元素特征及其成矿指示意义[J]. *黄金*, 2023, 44(4): 57 - 62.

[31] 蓝廷广, 胡瑞忠, 范宏瑞, 等. 流体包裹体及石英 LA - ICP - MS 分析方法的建立及其在矿床学中的应用[J]. *岩石学报*, 2017, 33(10): 3 239 - 3 262.

## In-situ composition and geologic significance of multi-stage quartz in Xicha Gold - Silver Deposit, Jilin Province

Ma Minxia<sup>1</sup>, Sun Lingyun<sup>2</sup>, Sun Jinlei<sup>2,3</sup>, Zhao Changji<sup>2</sup>, Qian Ye<sup>2,4</sup>

(1. Qianjiang Real Estate Registration Center; 2. School of Earth Sciences, Jilin University; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences;

4. Shandong Province Engineering Research Center for Deep Gold Mine Detection Big Data Application Development)

**Abstract:** Xicha Gold - Silver Deposit is classified as a mesothermal vein type deposit formed in the Early Cretaceous, primarily containing gold with associated silver. The mineralization process went through both a hydrothermal mineralization period and a supergene mineralization period, with the hydrothermal mineralization period divided into 3 stages, each characterized by the development of hydrothermal quartz. Using LA - ICP - MS in-situ micro-zone analysis techniques, micro element composition analysis of quartz at different mineralization stages was conducted. The results indicate that the second stage is the main mineralization stage with the strongest mineralization, serving as the primary gold mineralization phase. Gold-bearing minerals are predominantly sulfides, but during the second stage, the content of Sb and Bi significantly increases, and gold and silver show a positive correlation with other metallic elements such as copper, lead and zinc, suggesting that the gold-bearing minerals in the main mineralization stage may also include telluride and bismuthide, or be encapsulated in quartz in the form of fine particles. The quartz Ti geothermometer constructed based on the titanium content in hydrothermal quartz indicates a gradual decrease in mineralization temperature during the hydrothermal mineralization period. The systematic changes in Al, Ti, and Li content in quartz suggest a gradual increase in fluid pH from initial acidity towards neutral to weak alkalinity.

**Keywords:** hydrothermal quartz; LA - ICP - MS; in-situ micro-zone analysis technique; Ti geothermometer; ore-forming fluid; gold-bearing minerals