

青海省九八沟透闪石玉矿床成矿机制研究

李奕帆 赖勇[†]

造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

[†] 通信作者, E-mail: yonglai@pku.edu.cn

摘要 研究格尔木九八沟透闪石玉矿这一典型昆仑玉矿床的地质特征、矿物化学、矿体产状、含矿地层和侵入体岩石地球化学特征及成岩时代, 确定其成矿时代和成矿机理。结果表明, 控矿岩体似斑状二云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 427.1 ± 4.7 Ma。矿区内岩浆热液交代成因的矽卡岩中发育阳起石, 玉石中则为透闪石, 二者具有明显不同的矿物化学特征。结合岩浆、围岩、玉矿石和蚀变岩的全岩微量元素特征, 认为成矿过程是岩浆侵入含硅质团块白云岩, 引发接触热变质作用, 使得白云石和硅质团块直接发生变质反应而形成透闪石玉矿床。

关键词 透闪石玉; 成矿时代; 成矿机理; 九八沟; 青海省

Study on Metallogenic Mechanism of the Tremolite Jade Deposit in Jiubagou, Qinghai Province

LI Yifan, LAI Yong[†]

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: yonglai@pku.edu.cn

Abstract Jiubagou tremolite jade deposit in Golmud district is one of the typical Kunlun jade deposits. The metallogenic mechanism and age of this deposit are determined based on the systematic study of field geological characteristics, mineral chemistry, ore body occurrence, geochemical characteristics of ore-bearing strata and intrusion, and diagenetic age. The metallogenic intrusive rock is dominated by porphyritic two-mica monzogranite with a zircon U-Pb age of 427.1 ± 4.7 Ma. Actinolite is developed in skarn of magmatic hydrothermal metasomatism, while tremolite is developed in the tremolite jade. They have obviously different mineral chemical characteristics. Combined with the whole rock trace element characteristics of magma, wall rock, the tremolite jade and the skarn, it is proposed that the magma intrudes into the siliceous dolomite and causes the contact thermal metamorphism, which leads to the direct metamorphism between the dolomite and the siliceous mass and forms the tremolite deposit.

Key words tremolite jade; the age of mineralization; metallogenic mechanism; Jiubagou; Qinghai Province

透闪石玉的组成矿物主要为透闪石, 含量通常大于 95%。根据其赋矿围岩的岩性, 可将透闪石玉分为蛇纹岩型和白云岩型, 前者为富 Ca、Si 热液交代蛇纹岩成因, 后者为富 Si 热液交代白云岩或硅质白云岩变质成因^[1]。1992 年以来, 东昆仑地区陆续发现三岔河、纳赤台、拖拉海、羊皮岭、没草沟、大灶火河、小灶火河和九八沟等一系列透闪石玉矿

床, 分别为中酸性、基性和超基性岩侵入白云岩形成, 其中与基性和超基性岩浆有关的矿床通常为接触交代成因^[2-4], 与中酸性岩浆有关的矿床可能为接触交代或接触热变质成因^[5-7]。

在中酸性岩浆岩和白云岩的接触带, 往往发育矽卡岩化, 并可能产出透闪石玉。矽卡岩带常出现透闪石-铁阳起石系列矿物, 目前尚欠缺对玉矿与

矽卡岩中角闪石的对比研究。东昆仑地区自然环境恶劣,岩浆和构造关系复杂,找矿难度大。近年来,虽然对东昆仑地区透闪石玉的地质特征和成因研究不断取得新成果,但对矿床成因尚有不同的认识。九八沟透闪石玉产出于中酸性岩基侵入白云岩的接触带附近,矿床研究程度低,成因尚不明确。本文通过探究九八沟玉矿的成因机制,试图厘清岩浆在成矿中的作用,为进一步找矿提供理论依据。

1 区域地质背景

东昆仑地区下元古界到新生界地层均有发育,集中在前寒武纪、奥陶纪、石炭-二叠纪、三叠纪及新生代^[8-9],岩性主要为白云岩、大理岩和碎屑岩等。透闪石玉赋矿地层主要是中元古界万宝沟群(三岔河玉矿、拖拉海玉矿和九八沟玉矿等),岩性为火山岩-碳酸盐岩组合;其次是下元古界金水口群^[10-11](大灶火河玉矿和小灶火河玉矿等),岩性为片麻岩和混合岩组合,夹石英岩和镁质大理岩透镜体;部分矿点位于中元古界长城系小庙组和蓟县系狼牙山组地层中;个别矿点位于二叠系地层中^[11]。

该区属于东昆仑造山带。该造山带位于青藏高原东北缘的中央造山带西部,临近昆仑-柴达木地块与巴颜喀拉-松潘-羌塘地块的结合带,北部以柴达木盆地东缘为界,南抵巴颜喀拉山脉,西部以北东走向的阿尔金走滑断裂为界,属于典型的复合增生造山带(图 1)^[12]。该区的构造演化史主要包括前寒武古陆形成、加里东期造山(包括早古生代洋盆开合及加里东褶皱山链的形成)、晚华力西-印支期造山

(包括古特提斯洋盆开合和柴北缘及东昆仑-巴颜喀拉褶皱山链的形成)以及中生代叠复造山 4 个构造旋回^[13-14]。

区内岩浆活动十分发育,主要为中酸性岩浆岩,包括华力西期和印支期的花岗闪长岩和二长花岗岩,以及少量早古生代岩体^[15-16]。纳赤台北早古生代岩体又称万宝沟岩体。此外,晚元古代和早古生代等时期的拉张伸展作用导致的板块破裂形成一系列基性岩浆,以岩脉和岩墙形式产出。

强烈的构造和岩浆活动使东昆仑地区广泛分布深大断裂和次级挤压破碎带,岩浆热液活动广布。在中酸性岩体和碳酸盐岩地层接触带附近,接触热变质和接触交代作用均十分强烈,为透闪石玉成矿提供了有利条件。

2 矿区地质特征

九八沟矿区位于东昆仑造山带中部,介于昆中断裂与昆南断裂之间(图 1)。区内构造活动强烈,褶皱断裂发育,经历多期叠加与改造^[17-18](图 2)。断裂以 EW 向和 NWW 向为主,其次为 NE 向。矿区地层主要是中元古界万宝沟群碳酸盐岩和碎屑岩^[17]。碳酸盐岩包括硅质团块白云岩及白云质大理岩(图 3(c)和(f)),有明显的重结晶现象。碎屑岩以紫红色粉砂岩为主。玉石矿体赋存于万宝沟群硅质团块白云岩中。矿区地层裂隙较发育(图 5(e)和(f)),但赋存矿体白云岩构造裂隙少,为厚层块状(图 3(c)和(d))。

矿区西侧侵入加里东期中酸性岩基,即万宝沟

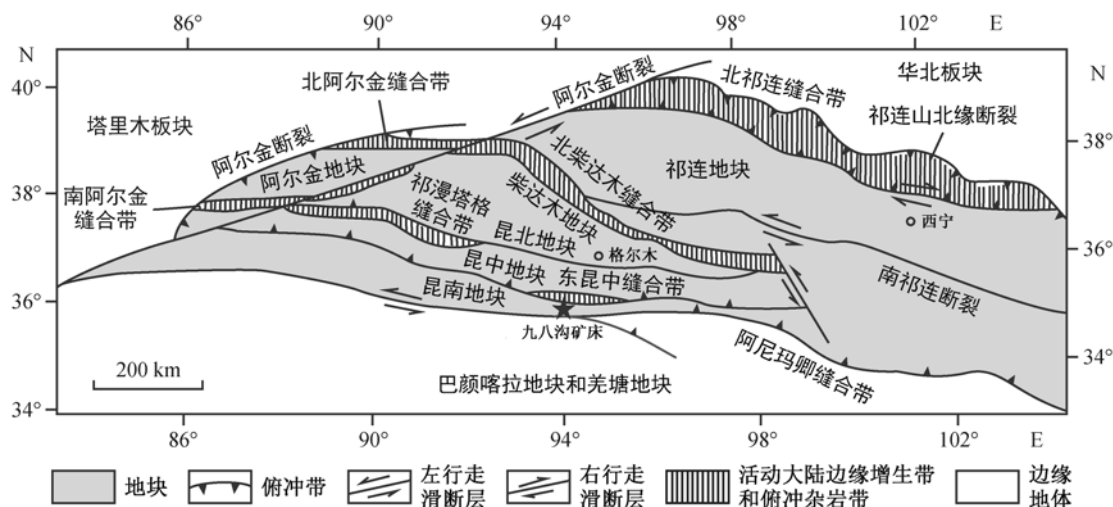


图 1 东昆仑地区区域地质简图(据文献[12]修改)

Fig. 1 Regional geological map of East Kunlun region (modified after Ref. [12])

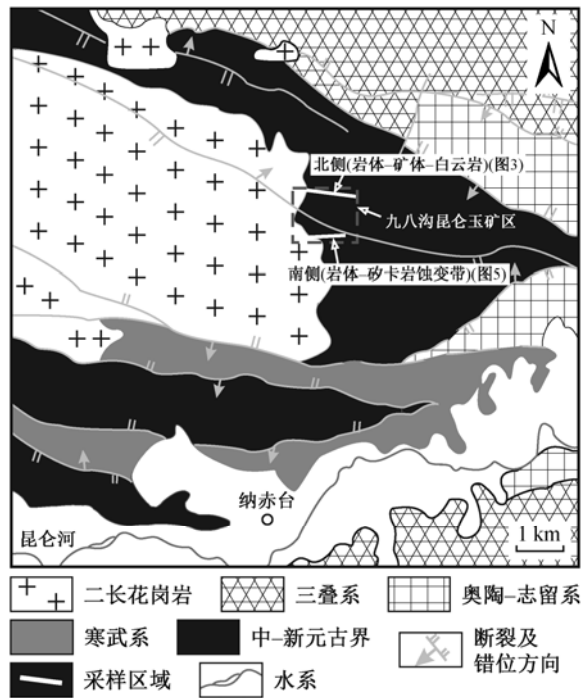


图2 矿区周边地质示意图(据文献[18]修改)

Fig. 2 Geological sketch map around the mining area (modified after Ref. [18])

岩体,为似斑状二云母二长花岗岩,具有典型的似斑状结构,斑晶为粗大的条纹长石(图3(a))。

在侵入体与硅质白云岩围岩的接触带附近,围岩蚀变和变质现象十分发育。根据矿物组合、形态和产状,可划分两种围岩蚀变类型:1)矿体周围(矿区北侧)主要为透闪石化和滑石化;2)其他接触区域(矿区南侧)为典型的矽卡岩化蚀变分带(图2)。

2.1 接触变质特征

矿体主要产于北侧与侵入岩紧密接触的硅质白云岩中(图2),产出位置严格受侵入岩控制。白云岩形态较完整,构造裂隙不发育,矿体整体上呈厚层块状(图3(c)和(d))。矿石类型为块状或浸染状,形态变化大。块状矿石为较纯的透闪石岩,主要矿物为透闪石,局部可见后期充填或交代形成的方解石及白云石;浸染状矿石主体为重结晶白云岩,透闪石不均匀地分布于白云石之间,局部可见细粒石英集合体(图4(a))。早期透闪石为微细粒集合体状,形成纤维交织结构或毛毡状结构(图4(b));块状矿石中则呈现不同形态的透闪石互相叠加,晚期透闪石呈粗粒长柱状,相对自形,为早期透闪石重结晶产物(图4(c))。透闪石重结晶程度是评价其玉石化的重要指标^[19],纤维交织结构或毛毡状结构的透闪

石有定向的细粒集合体,这类玉石手标本温润细腻,呈半透明状;局部重结晶的透闪石颗粒较粗大,不均匀,玉石质地较差。

玉矿体及其白云岩围岩中未见明显蚀变现象,仅在远离岩体一侧白云岩中发育滑石、蛇纹石和金云母,未见硅酸盐矿物之间交代残余或假象结构。白云岩中滑石呈鳞片状,分布均匀(图4(d)),蛇纹石主要为粒状集合体,金云母呈自形片状散布。

2.2 矽卡岩蚀变分带特征

矿区南侧具有较完整的矽卡岩分带(图3),距岩体由近至远可分为石榴石带、透辉石带和阳起石带。石榴石带的主要矿物为石榴子石,次要矿物为绿帘石、阳起石及极少量符山石和黑云母,其中石榴子石主要为钙铁榴石,形态为粒状,粒径粗大(图5(b));透辉石带的主要矿物组合为透辉石-次透辉石,含少量阳起石、符山石和蛇纹石,可见透辉石被阳起石交代的现象(图5(d)和图6(d)),辉石周围亦可见放射状或簇状蛇纹石(图6(e));阳起石带的主要矿物为阳起石或铁阳起石,含少量次透辉石及黑云母或富铁金云母,野外可见角砾岩化(图5(a))。上述分带中的黑云母和富铁金云母为片状和粒状,分布在石榴子石与阳起石等矿物之间,具有显著的多色性,呈现交代石榴子石及阳起石的特征(图6(f))。矽卡岩带未见透闪石。

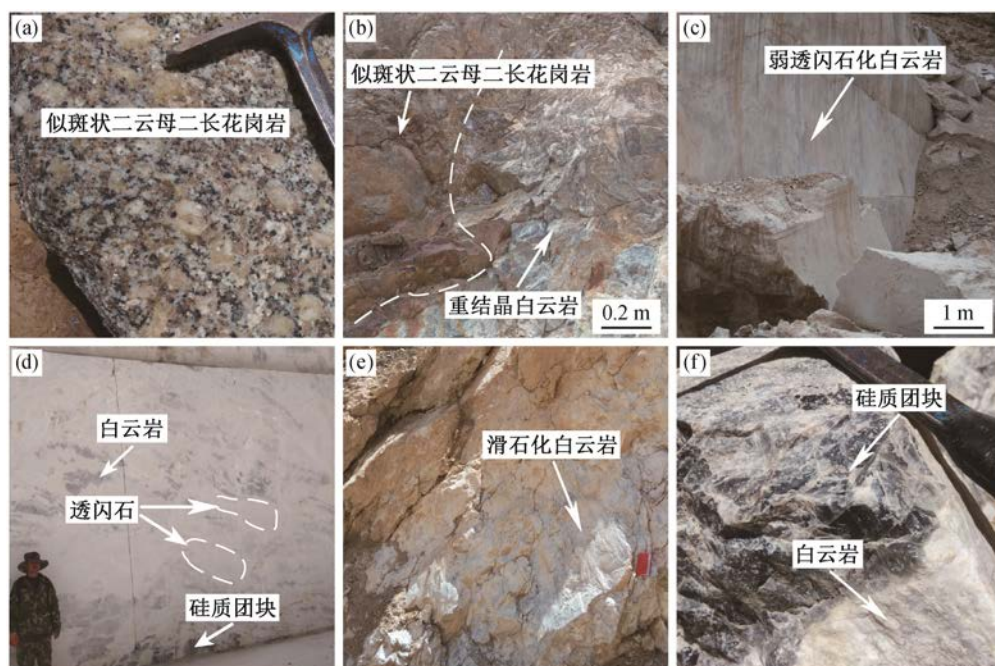
3 实验方法和结果

3.1 分析方法

对矿区二长花岗岩、矽卡岩、白云岩和透闪石玉矿石样品进行主量元素、微量元素和稀土元素分析。测试工作在广州澳实矿物实验室完成,主量元素分析采用X荧光光谱法(ME-XRF26d),烧失量分析采用称重法,微量元素分析采用等离子发射光谱法(ME-ICP68和ME-ICP61)。分析结果见表1。

结合探针片显微镜下特征及矿物分布特点,选取九八沟矿区闪石族矿物及碳酸盐矿物进行电子探针元素分析,测试工作在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,电子探针型号为JEOL-JXA8100,加速电压为15 kV,束流为10 nA,硅酸盐矿物束斑直径为2 μm,碳酸盐矿物束斑直径为10 μm。使用PRZ方法进行校正。分析结果见表2。

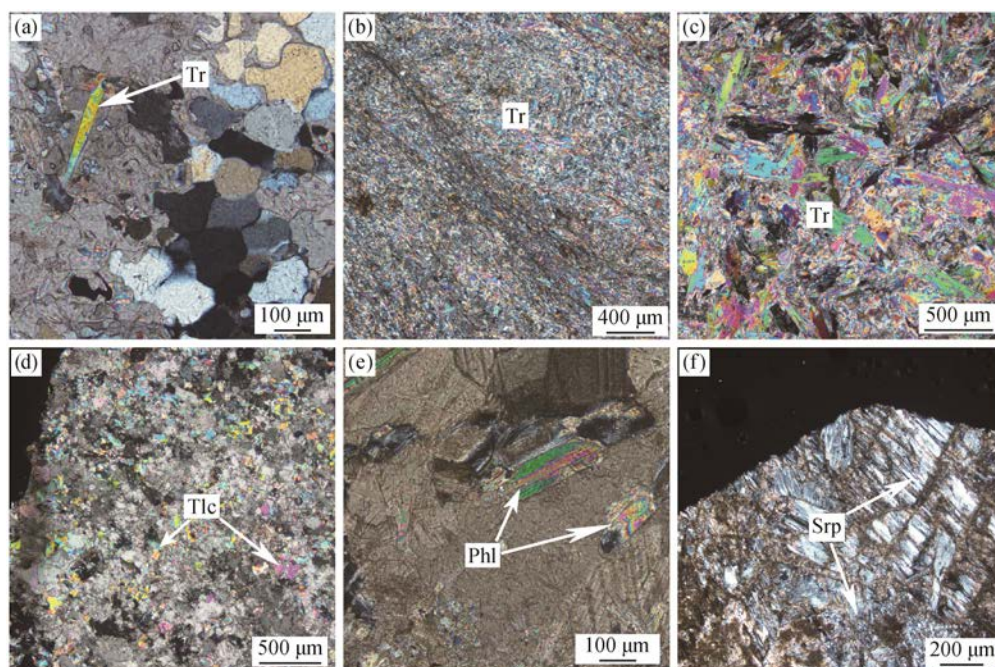
对二长花岗岩(JBG-143)进行碎样,并挑选锆石制靶。锆石U-Pb定年在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室LA-ICP-MS实验室完成,激光



(a) 侵入体呈似斑状结构, 斑晶为条纹长石; (b) 与岩体接触的白云岩发生重结晶; (c) 白云岩发生弱透闪石化, 呈厚层块状, 构造裂隙不发育; (d) 透闪石矿体, 矿石形态为块状或浸染状; (e) 远离岩体方向, 透闪石化过渡为滑石化; (f) 未发生蚀变的硅质团块白云岩

图 3 矿区北侧地质特征

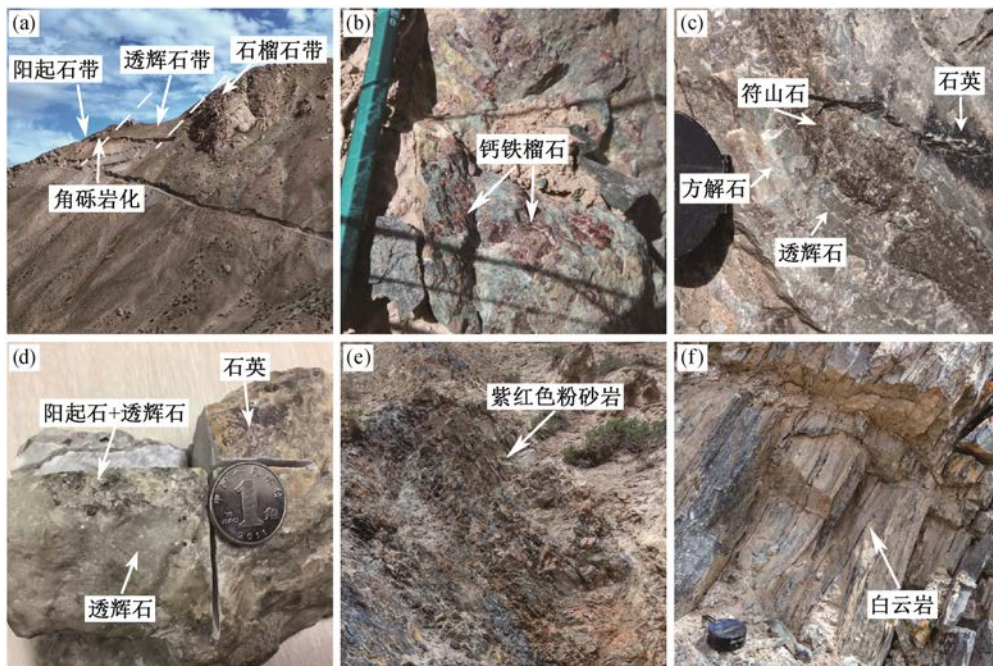
Fig. 3 Geological characteristics in the north of the mining area



(a) 碳酸盐矿物与石英接触边界发生溶蚀, 形成透闪石; (b) 早期纤维交织结构或毛毡状结构透闪石集合体; (c) 后期应力作用下发生重结晶的粗粒长柱状透闪石; (d) 白云岩中均匀分布的片状和粒状滑石; (e) 自形的长片状金云母; (f) 粒状蛇纹石集合体(保留原白云石的解理)。Tr: 透闪石; Tlc: 滑石; Phl: 金云母; Srp: 蛇纹石

图 4 九八沟矿区北侧样品显微镜下照片

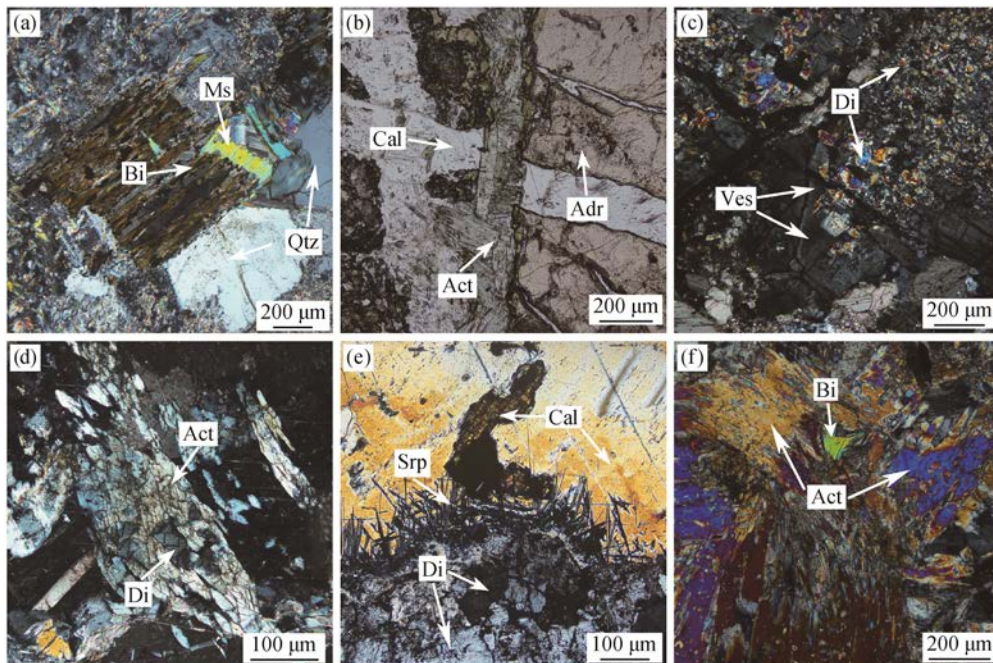
Fig. 4 Photomicrographs of samples from north mining area of Jiubagou deposit



(a) 矽卡岩化蚀变分带: 石榴石带-透辉石带-阳起石带; (b) 矽卡岩带中的石榴石; (c) 透辉石带中的符山石、透辉石; (d) 阳起石带中的阳起石交代透辉石; (e) 层理清晰的粉砂岩地层; (f) 节理、破裂发育的白云岩

图 5 矿区南侧地质特征

Fig. 5 Geological characteristics in the south of the mining area



(a) 二长花岗岩中早期结晶的黑云母和较晚结晶的白云母; (b) 阳起石交代钙铁榴石; (c) 透辉石交代符山石; (d) 阳起石交代透辉石; (e) 蛇纹石交代透辉石并围绕其边缘生长; (f) 黑云母呈片状分布在阳起石空隙间。Pth: 条纹长石; Adr: 钙铁榴石; Act: 阳起石; Cal: 方解石; Ves: 符山石; Di: 透辉石; Srp: 蛇纹石; Bi: 黑云母

图 6 九八沟矿区南侧样品显微镜下照片

Fig. 6 Photomicrographs of samples from the south mining area of Jiubagou deposit

表 1 全岩主量元素(%)及微量元素(mg/g)含量
Table 1 Concentration of major (%) and trace (mg/g) elements of the samplest

分析项目	透闪石玉			滑石化白云岩	白云岩	二长花岗岩					各阶段矽卡岩			
	JY-3	JBG-4	JBG-22	JBG-29	JBG-60	JBG-11	JBg-45	JBG-143	JBG-144	JBG-200	1	2	3	4
SiO ₂	44.00	50.74	50.94	5.99	0.57	65.20	72.97	71.76	65.30	70.79	47.43	53.64	23.90	41.87
TiO ₂	<0.01	<0.01	0.01	0.03	<0.01	0.61	0.55	0.43	0.47	0.24	1.01	0.85	0.37	0.02
Al ₂ O ₃	0.05	0.08	0.04	0.33	<0.01	15.55	12.77	13.04	15.50	14.71	6.56	4.52	3.18	2.10
TFeO	0.31	0.17	0.20	0.14	0.03	4.99	2.64	2.03	4.04	2.13	13.41	5.42	2.91	2.88
MnO	0.02	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.07	0.03	0.01	0.05	0.03	0.15	0.08	0.13	0.03
MgO	18.80	21.50	21.40	17.65	21.00	0.93	0.66	0.35	0.67	0.36	4.45	11.00	20.80	13.25
CaO	24.00	19.60	19.35	33.90	31.40	2.09	1.01	0.87	1.88	1.16	19.90	18.85	24.60	20.57
Na ₂ O	0.01	0.03	0.01	0.01	<0.01	3.63	2.96	1.55	3.63	3.79	0.50	0.39	0.09	0.05
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.02	<0.01	4.52	4.70	7.47	5.04	5.04	4.13	3.12	0.36	0.43
P ₂ O ₅	<0.01	0.03	0.11	0.03	<0.01	0.17	0.14	0.09	0.13	0.06	0.07	0.05	0.04	0.23
烧失量	12.29	7.85	7.54	40.86	46.31	1.97	1.42	1.88	2.49	1.42	1.98	2.24	23.75	18.61
总和	99.49	100.02	99.62	98.97	99.31	99.73	99.85	99.48	99.20	99.73	99.59	100.16	100.13	100.04
Cs	0.16	0.26	0.14	0.22	0.06	18.45	15.95	7.05	21.70	11.33	4.28	6.96	6.35	2.16
Rb	0.50	0.40	0.20	0.80	0.10	276.00	250.00	311.00	353.00	322.00	33.00	102.50	5.70	1.50
Ba	1.90	1.60	2.00	<0.5	11.00	780.00	442.00	619.00	578.00	356.00	1645.00	2900.00	78.80	93.60
Sr	74.60	44.90	38.90	30.90	67.90	257.00	54.30	32.80	115.00	87.60	27.10	31.90	88.30	54.10
Th	0.10	0.05	0.06	0.26	0.02	40.90	33.80	50.90	34.20	29.80	0.28	0.20	0.41	0.37
U	0.39	1.25	0.84	2.23	0.05	5.21	4.48	6.24	5.93	7.26	0.66	0.32	0.36	1.28
Nb	0.20	0.20	0.20	0.40	0.10	18.80	14.30	13.40	16.50	11.00	3.90	2.70	2.30	0.30
Ta	<0.05	0.05	0.05	<0.05	0.05	1.63	0.68	1.30	1.61	1.41	0.20	0.16	0.13	0.05
Zr	<2	3.00	5.00	3.00	1.00	480.00	401.00	320.00	332.00	195.00	57.00	47.00	31.00	7.00
Hf	<0.1	0.10	0.10	<0.1	0.10	11.40	9.80	8.90	8.80	6.00	1.50	1.30	0.90	0.10
La	0.10	0.10	0.20	0.50	0.20	74.60	83.60	55.70	60.30	32.00	3.90	3.10	3.60	1.60
Ce	0.42	0.30	0.49	0.99	0.40	152.00	169.50	110.50	122.50	66.20	11.10	8.80	8.40	3.90
Pr	0.03	0.04	0.04	0.12	0.03	17.10	18.25	12.55	14.20	7.85	1.67	1.35	1.13	0.37
Nd	0.20	0.20	0.20	0.50	0.10	61.60	64.10	44.40	50.00	29.70	8.30	6.40	5.40	1.50
Sm	0.03	0.05	0.07	0.11	0.03	12.45	11.65	7.50	9.66	5.83	2.64	1.89	1.51	0.36
Eu	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	1.23	0.73	0.85	1.08	0.71	1.07	0.63	0.57	0.06
Gd	0.05	0.06	0.06	0.13	0.06	10.95	8.62	5.45	7.98	5.05	3.18	2.31	1.80	0.29
Tb	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	1.73	1.34	0.76	1.28	0.80	0.53	0.40	0.32	0.05
Dy	0.05	0.05	0.07	0.14	0.05	10.45	7.63	4.22	7.53	4.83	3.30	2.51	2.01	0.35
Ho	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	2.03	1.40	0.85	1.51	1.06	0.72	0.52	0.44	0.08
Er	0.03	0.04	0.06	0.08	0.04	5.73	3.83	2.51	4.21	3.16	1.94	1.45	1.20	0.24
Tm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.83	0.54	0.38	0.63	0.48	0.28	0.20	0.17	0.04
Yb	0.03	0.07	0.06	0.10	0.07	5.26	3.33	2.59	4.03	3.36	1.66	1.17	1.04	0.26
Lu	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.81	0.53	0.42	0.64	0.53	0.25	0.15	0.14	0.04
Y	0.30	0.30	0.40	1.20	0.40	56.00	38.80	24.60	44.30	31.30	16.90	13.50	11.50	2.80
Ga	0.30	0.27	0.19	0.41	0.12	26.80	19.60	17.85	26.40	23.20	10.80	6.75	5.02	0.50
Tl	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	1.95	1.20	1.73	2.10	1.67	0.15	0.59	0.02	0.02
W	0.10	0.20	0.50	0.20	0.10	3.20	6.90	19.60	2.60	2.30	47.40	1.10	0.10	0.30
Sn	8.00	1.60	3.60	1.00	0.20	18.20	45.30	11.10	18.70	11.60	0.80	3.70	0.20	1.30
Mo	0.14	0.07	0.11	0.24	0.07	0.48	0.59	5.16	1.54	0.75	0.56	0.10	0.15	0.05
Bi	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.15	1.60	0.40	1.69	0.22	0.04	0.02	0.01	0.01
Pb	0.60	0.50	0.50	0.80	0.50	34.20	19.20	22.70	30.90	30.20	54.20	5.80	1.50	1.20
Zn	15.00	20.00	11.00	17.00	5.00	68.00	31.00	13.00	56.00	29.00	47.00	48.00	24.00	12.00
Ti	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.37	0.27	0.25	0.28	0.15	0.61	0.50	0.22	0.01

续表

分析项目	透闪石玉			滑石化白云岩	白云岩	二长花岗岩					各阶段矽卡岩			
	JY-3	JBG-4	JBG-22	JBG-29	JBG-60	JBG-11	JBg-45	JBG-143	JBG-144	JBG-200	1	2	3	4
Ag	<0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	2.24	0.02	0.01	0.01
As	8.00	3.20	2.70	7.90	2.70	5.30	880.00	112.50	75.80	73.70	35.40	13.80	6.50	7.50
ΣREE	1.01	0.98	1.33	2.78	1.05	356.77	375.05	285.55	248.68	161.56	40.54	30.88	27.73	9.14
LREE	0.86	0.78	1.09	2.38	0.85	329.93	356.45	265.72	236.95	147.34	31.86	24.48	22.41	8.08
HREE	0.15	0.20	0.24	0.40	0.20	26.84	18.60	19.83	11.73	14.22	8.68	6.40	5.32	1.06
LREE/HREE	5.73	3.90	4.54	5.95	4.25	12.29	19.16	13.40	20.20	10.36	3.67	3.83	4.21	7.62
K ₂ O/Na ₂ O	1.00	0.33	1.00	2.00	1.00	1.25	1.59	4.82	1.39	1.33	8.26	8.00	4.00	8.60
A/CNK	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	1.52	1.47	1.47	1.31	1.47	0.27	0.20	0.13	0.10
A/NK	2.50	2.00	2.00	11.00	0.00	1.91	1.67	1.79	1.44	1.67	1.42	1.29	7.07	4.38
Mg#	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	0.25	0.31	0.23	0.23	0.23	0.37	0.79	0.93	0.89

说明: 1 代表石榴石矽卡岩, 2 代表透辉石矽卡岩, 3 代表含透辉石金云母矽卡岩, 4 代表阳起石矽卡岩; A 代表 Al₂O₃, C 代表 CaO, N 代表 Na₂O, K 代表 K₂O, 下同。

器型号为 ComPex102, 质谱系统仪器型号为 Agilent 7500 ce/cs, 分析束斑束斑直径为 32 μm。使用 Ple-sovice 锆石作为标样, 采用 GLITTER4.4.2 和 Isoplot/Ex 3.0 进行信号处理及普通铅校正。角闪石单矿物微量元素分析仪器同上, 激光束斑直径为 60 μm, 采用 NIST 610 作为标样进行元素校正, 锆石 U-Pb 定年及矿物微量元素分析结果见表 3 和 4。

3.2 分析结果

矿区花岗岩具有高 SiO₂ (65.20%~72.97%)、富 FeO^T (2%~5%)、富碱(K₂O+Na₂O 为 7.66%~9.02%)、贫 CaO (0.87%~2.09%)、低 MgO (0.35%~0.93%) 的特点, 属高钾钙碱性岩浆岩。花岗岩岩体的 ΣREE 值为 248~285 mg/g, 平均 267.12 mg/g, 呈现轻稀土富集、重稀土亏损的特点, 明显富集 U, Pb 和 Rb, 亏损高场强元素(HFSEs)。白云岩围岩富集 MgO (≈21%), 贫 FeO^T, 贫稀土元素。矿区北侧矿石相对富 SiO₂ (40%~55%), 具有类似白云岩的 Fe, Mg 及稀土含量特征。矿区南侧石榴石矽卡岩 FeO^T 和 MgO 含量分别为 13.4% 和 4.5%, 透辉石矽卡岩的 FeO^T 和 MgO 含量分别为 5.4% 和 11.0%, 阳起石矽卡岩的 FeO^T 和 MgO 含量分别为 2.9% 和 13.3%, 矽卡岩样品中稀土含量介于白云岩与二长花岗岩之间, 轻重稀土分馏不明显(表 1)。

电子探针分析结果显示矿区北侧角闪石普遍富 Mg 贫 Fe, 为透闪石类矿物, 矿区南侧的角闪石则普遍富 Fe 贫 Mg, 为阳起石类矿物(表 2)。此外, 矿区两侧蛇纹石及金云母亦呈现北侧富 Mg 贫 Fe、南

侧贫 Mg 富 Fe 的特点。微量元素分析结果显示矿区北侧透闪石稀土含量普遍低于 0.2 mg/g, 与白云岩类似。矿区南侧阳起石具有不同程度的 Hf, Pb, Zr, Y 和 REE 富集特点(表 4)。

二长花岗岩(JBG-143)锆石晶型完整, 发育震荡环带(图 7), 16 颗锆石的 Th/U 值变化范围在 0.23~0.66 之间, 为典型岩浆锆石。²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 427.1±4.7 Ma (MSWD=2.8, n=16)(表 3, 图 7)。

4 九八沟透闪石玉的成矿时代及矿床成因

九八沟矿区内万宝沟岩体和万宝沟群硅质团块白云岩的南北两侧接触带呈现两种不同的特征: 北侧发育矿体, 为厚层块状, 裂隙不发育, 矿物组合为透闪石、滑石和富 Mg 金云母, 不具有热液蚀变特征; 南侧裂隙和破碎发育, 蚀变分带显著, 分为石榴石带、辉石带和阳起石带, 早期矿物与晚期矿物之间多有交代残余和假象结构。北侧呈现接触热变质特征, 南侧呈现矽卡岩热液蚀变特征。

九八沟矿体的展布严格受万宝沟岩体控制。万宝沟群地层变质程度为低绿片岩相^[20], 碎屑岩和碳酸盐岩层理较清晰, 变形、变质不明显(图 5(e)和(f)), 表明透闪石玉的形成不是由区域变质作用主导, 岩浆侵入活动是九八沟玉矿形成的主导因素。因此, 万宝沟岩体与九八沟玉矿的形成具有直接的时空关联, 岩体年龄可以反映成矿时代。

4.1 成矿时代

王晓霞等^[21]对万宝沟岩体西南的似斑状黑云母二长花岗岩测定的锆石 U-Pb 年龄为 423~456 Ma,

加权平均年龄为 441 ± 5 Ma。邓红宾等^[22]对岩体东部似斑状黑云母花岗闪长岩测定的锆石 U-Pb 年龄为 422.2~429.5 Ma, 加权平均年龄为 427.0 ± 3.1 Ma。

表 2 典型角闪石样品电子探针主量元素含量(%)及分子式估算

Table 2 Concentration of major elements content (%) by EPMA and estimation of molecular formula of typical amphibole samples

矿物	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
玉石中角闪石	JY-2	59.70	—	0.04	—	0.19	0.03	24.85
	JY-3	59.70	—	0.09	—	0.26	0.03	24.71
	JY-4-1	59.80	—	0.15	0.03	0.23	0.04	24.93
	JY-4-2	59.79	—	0.12	—	0.19	—	24.85
	JBG-22	59.52	0.02	0.02	—	0.20	—	24.61
石榴石带中角闪石	JBG-9	54.09	0.04	1.61	—	15.18	0.26	14.20
	JBG-9	54.62	—	1.29	—	13.67	0.32	15.02
透辉石带中角闪石	JBG-10	56.09	0.02	0.58	0.01	10.37	0.26	17.44
	JBG123	55.42	0.01	2.00	—	9.84	0.16	17.21
	JBG123	53.39	0.34	3.24	0.06	10.65	0.13	16.50
阳起石带中角闪石	JBG-83	57.28	0.07	1.58	—	6.06	0.25	19.61
	JBG-83	57.22	—	0.18	—	9.34	0.05	18.32
	JBG-83	57.43	0.05	0.92	0.04	6.85	—	19.53
矿物	样品号	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总和	Si	Al(IV)	T
玉石中角闪石	JY-2	14.08	0.01	0.02	98.93	7.97	0.02	7.99
	JY-3	13.99	0.06	0.04	98.88	8.00	—	8.00
	JY-4-1	13.88	0.01	—	99.07	7.96	0.04	8.00
	JY-4-2	13.88	0.08	—	98.91	7.88	0.12	8.00
	JBG-22	14.63	0.04	0.01	99.04	7.97	—	7.98
石榴石带中角闪石	JBG-9	11.96	0.45	0.15	98.04	7.80	0.20	8.00
	JBG-9	12.24	0.41	0.07	97.68	7.87	0.13	8.00
透辉石带中角闪石	JBG-10	12.86	0.04	0.02	97.70	7.95	0.05	8.00
	JBG123	13.95	0.22	0.12	98.97	7.79	0.21	8.00
	JBG123	13.79	0.40	0.20	98.70	7.58	0.42	8.00
阳起石带中角闪石	JBG-83	13.12	0.07	0.15	98.19	7.93	0.07	8.00
	JBG-83	14.29	0.07	0.02	99.50	7.96	0.03	7.99
	JBG-83	14.19	0.15	0.10	99.35	7.92	0.08	8.00
矿物	样品号	Al(VI)	Ti	Cr	Fe(III)	Fe(II)	Mn	Mg
玉石中角闪石	JY-2	—	0.01	—	—	0.03	—	4.97
	JY-3	0.01	—	—	—	0.02	—	4.83
	JY-4-1	0.09	—	—	—	1.11	0.01	3.77
	JY-4-2	0.07	0.01	—	—	0.86	—	3.96
	JBG-22	—	—	—	—	0.02	—	4.92
石榴石带中角闪石	JBG-9	0.08	—	—	0.26	1.57	0.03	3.05
	JBG-9	0.09	—	—	0.14	1.51	0.04	3.23
透辉石带中角闪石	JBG-10	0.05	—	—	0.07	1.16	0.03	3.69
	JBG123	0.12	—	—	—	1.16	0.02	3.61
	JBG123	0.12	0.04	0.01	—	1.26	0.02	3.49
阳起石带中角闪石	JBG-83	0.18	0.01	—	—	0.70	0.03	4.05
	JBG-83	—	—	—	—	1.09	0.01	3.80
	JBG-83	0.07	0.01	—	—	0.79	—	4.01

续表								
矿物	样品号	C	Ca	Na	B	Na	K	A
玉石中角闪石	JY-2	5.01	2.01	—	2.01	0.02	—	0.02
	JY-3	4.86	2.13	—	2.13	0.01	—	0.01
	JY-4-1	4.98	1.99	0.01	2.00	—	0.01	0.01
	JY-4-2	4.91	2.08	—	2.08	0.03	0.02	0.05
	JBG-22	4.94	2.10	—	2.10	0.01	—	0.01
石榴石带中角闪石	JBG-9	5.00	1.85	0.13	1.97	—	0.03	0.03
	JBG-9	5.00	1.89	0.11	2.00	—	0.01	0.02
透辉石带中角闪石	JBG-10	5.00	1.95	0.01	1.96	—	—	—
	JBG123	4.90	2.10	—	2.10	0.06	0.02	0.08
	JBG123	4.94	2.10	—	2.10	0.11	0.04	0.15
阳起石带中角闪石	JBG-83	4.97	1.95	0.02	1.96	—	0.03	0.03
	JBG-83	4.89	2.13	—	2.13	0.02	—	0.02
	JBG-83	4.88	2.10	—	2.10	0.04	0.02	0.06

说明：粗体字分别表示以 23 个氧原子数为基准计算得出的角闪石 T 位、C 位、B 位和 A 位的原子数。

表 3 九八沟矿区二长花岗岩(YT) U-Pb 定年结果
Table 3 U-Pb isotopic compositions of zircons for Monzogranite (YT) from Jiubagou deposit

测点	Th/U	同位素比值($\pm 1\sigma$)				同位素年龄($\pm 1\sigma$)/Ma			
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}\pm 1\sigma$
YT-1	0.45	0.0554 \pm 0.0032	0.5288 \pm 0.0295	0.0692 \pm 0.0009	0.0216 \pm 0.0009	430 \pm 103	431 \pm 20	431 \pm 5	431 \pm 18
YT-2	0.66	0.0552 \pm 0.0022	0.5139 \pm 0.0200	0.0676 \pm 0.0008	0.0213 \pm 0.0007	420 \pm 67	421 \pm 13	421 \pm 5	427 \pm 14
YT-3	0.59	0.0551 \pm 0.0021	0.5081 \pm 0.0186	0.0669 \pm 0.0007	0.0198 \pm 0.0007	417 \pm 62	417 \pm 13	417 \pm 4	397 \pm 13
YT-4	0.23	0.0557 \pm 0.0026	0.5222 \pm 0.0236	0.0680 \pm 0.0008	0.0204 \pm 0.0009	442 \pm 80	427 \pm 16	424 \pm 5	408 \pm 19
YT-5	0.51	0.0555 \pm 0.0028	0.5366 \pm 0.0260	0.0702 \pm 0.0009	0.0207 \pm 0.0008	430 \pm 86	436 \pm 17	437 \pm 5	414 \pm 17
YT-6	0.53	0.0556 \pm 0.0029	0.5166 \pm 0.0262	0.0675 \pm 0.0008	0.0213 \pm 0.0009	435 \pm 91	423 \pm 18	421 \pm 5	425 \pm 17
YT-7	0.55	0.0557 \pm 0.0031	0.5374 \pm 0.0296	0.0700 \pm 0.0009	0.0223 \pm 0.0010	440 \pm 100	437 \pm 20	436 \pm 5	446 \pm 20
YT-8	0.43	0.0555 \pm 0.0025	0.5288 \pm 0.0234	0.0691 \pm 0.0008	0.0202 \pm 0.0009	432 \pm 78	431 \pm 16	431 \pm 5	404 \pm 17
YT-9	0.42	0.0565 \pm 0.0029	0.5471 \pm 0.0273	0.0702 \pm 0.0009	0.0214 \pm 0.0010	472 \pm 88	443 \pm 18	438 \pm 5	427 \pm 19
YT-10	0.58	0.0562 \pm 0.0030	0.5457 \pm 0.0283	0.0705 \pm 0.0009	0.0218 \pm 0.0010	459 \pm 92	442 \pm 19	439 \pm 5	436 \pm 20
YT-11	0.56	0.0565 \pm 0.0043	0.5499 \pm 0.0415	0.0706 \pm 0.0012	0.0222 \pm 0.0012	472 \pm 139	445 \pm 27	440 \pm 7	444 \pm 24
YT-12	0.31	0.0548 \pm 0.0036	0.5149 \pm 0.0328	0.0681 \pm 0.0010	0.0203 \pm 0.0012	404 \pm 118	422 \pm 22	425 \pm 6	406 \pm 23
YT-13	0.31	0.0554 \pm 0.0032	0.5157 \pm 0.0291	0.0675 \pm 0.0009	0.0209 \pm 0.0011	429 \pm 102	422 \pm 20	421 \pm 6	418 \pm 22
YT-14	0.29	0.0556 \pm 0.0034	0.5140 \pm 0.0307	0.0670 \pm 0.0010	0.0203 \pm 0.0011	438 \pm 108	421 \pm 21	418 \pm 6	406 \pm 22
YT-15	0.32	0.0568 \pm 0.0037	0.5324 \pm 0.0337	0.0680 \pm 0.0010	0.0197 \pm 0.0012	483 \pm 115	433 \pm 22	424 \pm 6	395 \pm 23
YT-16	0.66	0.0564 \pm 0.0036	0.5137 \pm 0.0321	0.0661 \pm 0.0010	0.0196 \pm 0.0011	468 \pm 113	421 \pm 22	412 \pm 6	393 \pm 22

考虑到该岩基不同部位年龄可能有所差别，我们对岩体东部(即九八沟似斑状二云母二长花岗岩)进行锆石 U-Pb 定年，得出加权平均年龄为 427 \pm 4.7 Ma (图 7)，与邓红宾等^[22]的测定结果基本上一致。因此，矿区万宝沟岩体的成矿时代应为早志留世。

4.2 矿床成因

4.2.1 矿物及岩石化学特征

矿物的成分标型是查明透闪石玉矿床成因的关键。透闪石既可以出现在中酸性岩浆岩与白云岩接触带的镁矽卡岩中，亦可以形成于含硅质团块白云

表 4 角闪石中主量元素(%)和微量元素含量(mg/g)
Table 4 Concentration of major elements (%) and trace (mg/g) elements of the hornblendes

元素	JBG-6-2	JBG-6-2	JBG-6-3	JBG-6-1	JBG-6-2	JBG-6-2	JY-4-1	JY-4-1	JY-4-2
MgO	20.16	12.10	12.71	17.12	14.21	13.60	20.84	21.05	23.18
FeO	2.34	8.55	8.08	4.68	6.93	7.39	1.80	1.65	—
Y	0.174	0.828	1.830	1.046	0.926	0.943	0.078	0.089	0.074
Zr	3.070	14.590	9.240	6.960	2.591	3.460	0.445	0.467	0.587
Hf	0.096	0.273	0.305	0.117	0.131	0.152	0.015	0.043	0.011
Pb	1.254	4.220	2.250	2.141	2.073	2.075	0.116	0.102	0.074
Nb	0.031	0.005	0.026	0.047	0.016	0.007	0.054	0.053	0.086
Ba	1.522	0.944	1.800	0.942	1.226	1.622	0.439	0.599	0.159
La	0.049	0.066	0.114	0.139	0.027	0.033	0.082	0.072	0.073
Ce	0.200	0.155	0.344	0.439	0.058	0.100	0.106	0.109	0.104
Pr	0.031	0.026	0.056	0.071	0.020	0.022	0.013	0.016	0.011
Nd	0.136	0.157	0.283	0.358	0.045	0.085	0.087	0.016	0.019
Sm	0.050	0.067	0.115	0.164	0.020	0.055	0.020	0.018	0.021
Eu	0.011	0.018	0.060	0.045	0.006	0.006	0.006	0.004	0.019
Gd	0.047	0.088	0.166	0.100	0.099	0.124	0.018	0.014	0.018
Tb	0.009	0.019	0.033	0.041	0.015	0.019	0.002	0.002	0.003
Dy	0.052	0.133	0.221	0.197	0.145	0.129	0.012	0.011	0.016
Ho	0.008	0.030	0.061	0.041	0.042	0.041	0.003	0.003	0.003
Er	0.016	0.118	0.185	0.146	0.124	0.147	0.006	0.009	0.025
Tm	0.001	0.020	0.032	0.016	0.026	0.023	0.006	0.003	0.002
Yb	0.021	0.156	0.326	0.074	0.273	0.214	0.011	0.016	0.037
Lu	0.001	0.030	0.060	0.043	0.055	0.046	0.004	0.003	0.003
LREE	0.523	0.578	1.139	1.317	0.274	0.425	0.332	0.249	0.263
HREE	0.108	0.505	0.918	0.558	0.680	0.620	0.045	0.048	0.089
Mg#	0.94	0.72	0.74	0.87	0.79	0.77	0.95	0.96	1.00

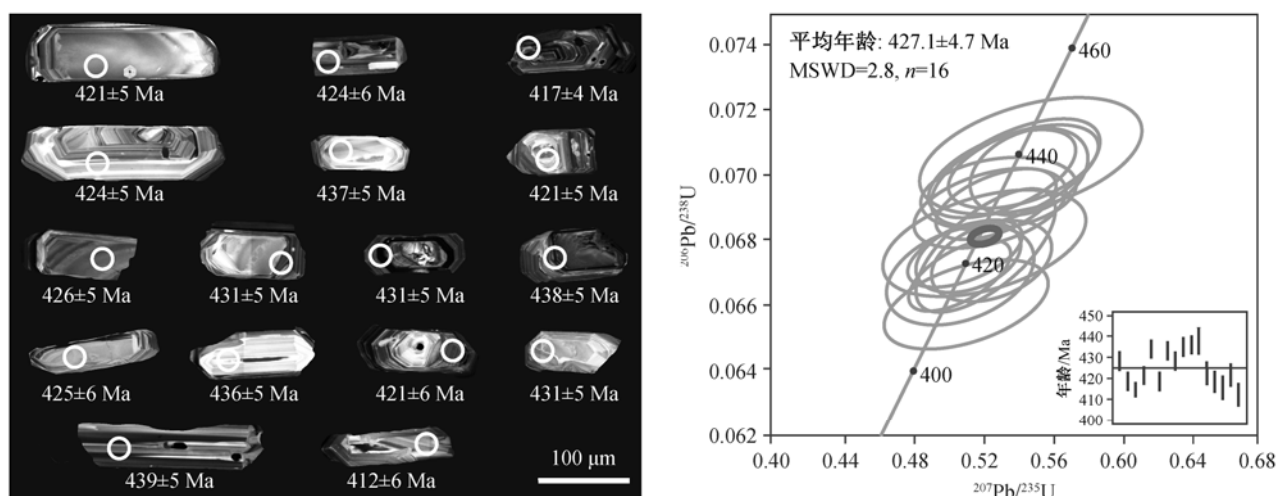


图 7 万宝沟岩体锆石阴极发光(CL)图像和 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 7 Zircon CL images and U-Pb concordia diagrams of the Wanbaogou intrusion

岩的变质作用过程中, 区别在于前者有岩浆流体和组份的加入。为探究透闪石玉是岩浆热液交代成因还是接触热变质成因, 我们对玉石中透闪石和矽卡岩带中角闪石进行对比研究。

透闪石和铁阳起石为类质同象系列矿物, 化学式分别为 $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}_2(\text{Fe}, \text{Mg})_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$ 。透闪石的形成需要 Ca, Mg, Si 离子及少量流体参与。根据全岩主量元素分析结果, 万宝沟岩体具有贫 Ca (CaO 含量为 0.87%~2.09%)、低 Mg (MgO 含量为 0.35%~0.93%) 的特点, 而白云岩十分富 Mg (Ca/Mg 约为 1.07, MgO ≈ 21.1%) (表 1), 因此 Ca 和 Mg 可能来自围岩, 即白云岩。

由于 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 完全类质同象替代, 故热液体系中的 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 相对含量决定角闪石的类型。将矿区内矽卡岩分带和玉石中角闪石类矿物电子探针主量元素数据 (其中 Fe^{2+} 及各原子数为估算后的值^[23]) 投到角闪石类矿物分类图解^[24] 中, 发现玉石中为纯透闪石, Mg# 值极高 (>0.99) (表 2, 图 8(a))。虽然不同透闪石颗粒的 Mg 含量略有变化, 但普遍贫 Fe 和 Mn (图 8(b))。矽卡岩中的角闪石均为阳起石, 其中产于石榴石带的阳起石 Mg# 值最低 (<0.70), 富集 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} , 与其最靠近岩体且形成于早期富 Fe 岩浆热液交代有关; 透辉石带中阳起石 Mg# 值稍高 (0.70~0.85), 与其分布于石榴石带外侧的特征相符; 远离岩体的阳起石带中阳起石 Mg# 值最高 (0.75~0.90)。可见, 矽卡岩蚀变带中角闪石的 Mg^{2+} 与 $\text{Fe}^{2+} + \text{Mn}^{2+}$ 有显著的线性负相关关系 (图 8(b)), 表明区内岩浆热液交代特征为越远离岩体, 受岩浆成分影响越小, 受白云岩影响越大, 越富 Mg 贫 Fe。

对万宝沟岩体、白云岩、矽卡岩、玉石和滑石化白云岩的全岩以及矽卡岩中阳起石和玉石中透闪

石的部分微量和稀土元素进行分析, 结果表明, 万宝沟岩体相对富集 Zr, Pb, Y, Ga 和 REE, 具有较低的 Ca 含量和 Mg# 值; 白云岩围岩则具有高含量和 Mg# 值, 贫 Zr, Pb, Y, Ga 和 REE (表 1, 图 9)。矽卡岩样品的全岩元素特征介于万宝沟岩体与白云岩之间, 显示岩浆流体交代作用特征; 透闪石玉微量元素与白云岩及滑石化白云岩基本上一致或略低, 表明玉石-围岩之间元素分馏基本上平衡, 透闪石玉的成矿物质主要由白云岩提供, 基本上没有外来物质介入。

闪石类矿物原位微量元素分析结果表明, 南侧矽卡岩带阳起石类矿物中 Hf, Pb, Zr, Y 和 REE 具有不同程度的富集 (表 4, 图 10), 这些元素可以在角闪石类矿物中发生有限的类质同象替代^[25], 其中稀土元素主要与六次配位的 Ca 离子发生替换, Pb, Zr 和 Hf 等离子则倾向于与 Si 或 Mg 离子发生置换, 因此角闪石类矿物对上述元素有一定的容纳能力。上述元素的含量与矿物的 Mg# 值负相关, 即元素含量随着远离岩体而降低。虽然北侧矿体离岩体很近, 但透闪石中 Hf, Pb, Zr, Y 和 REE 明显比南侧阳起石中低 (图 10), 表明其基本上没受岩浆热液影响, 透闪石中微量元素来源于围岩而不是岩浆。

4.2.2 矿床成因类型

玉石和石榴石矽卡岩中均含石英, 对两种石英进行阴极发光照射时, 二者呈现完全不同的发光特性。玉石中石英 (图 11(a)) 照射后不发荧光, 为黑色 (图 11(b)); 石榴石矽卡岩中石英 (图 11(c)) 发蓝紫色荧光 (图 11(d))。上述特征与石英发光性的一般规律一致, 即火山岩、深成岩或接触变质岩中的石英通常发蓝紫色荧光, 沉积成因的石英一般不发光^[26-27]。

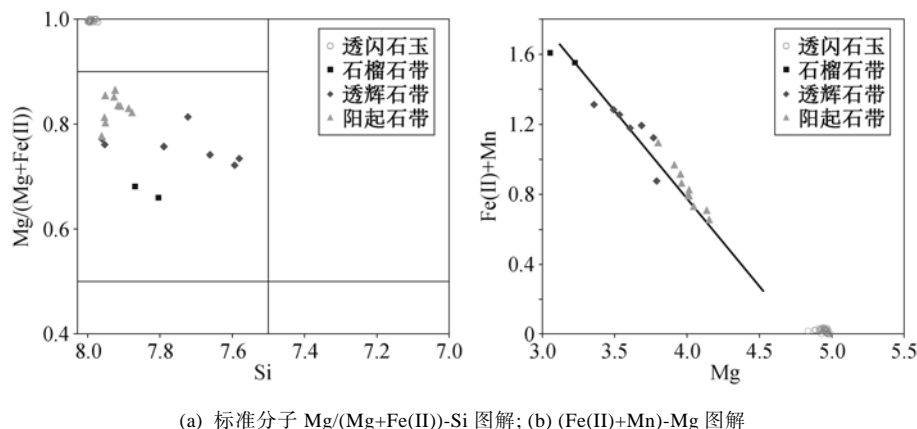


图 8 九八沟矿角闪石类矿物的矿物分类图解

Fig. 8 Mineral classification diagram of amphibole minerals in Jiubagou deposit

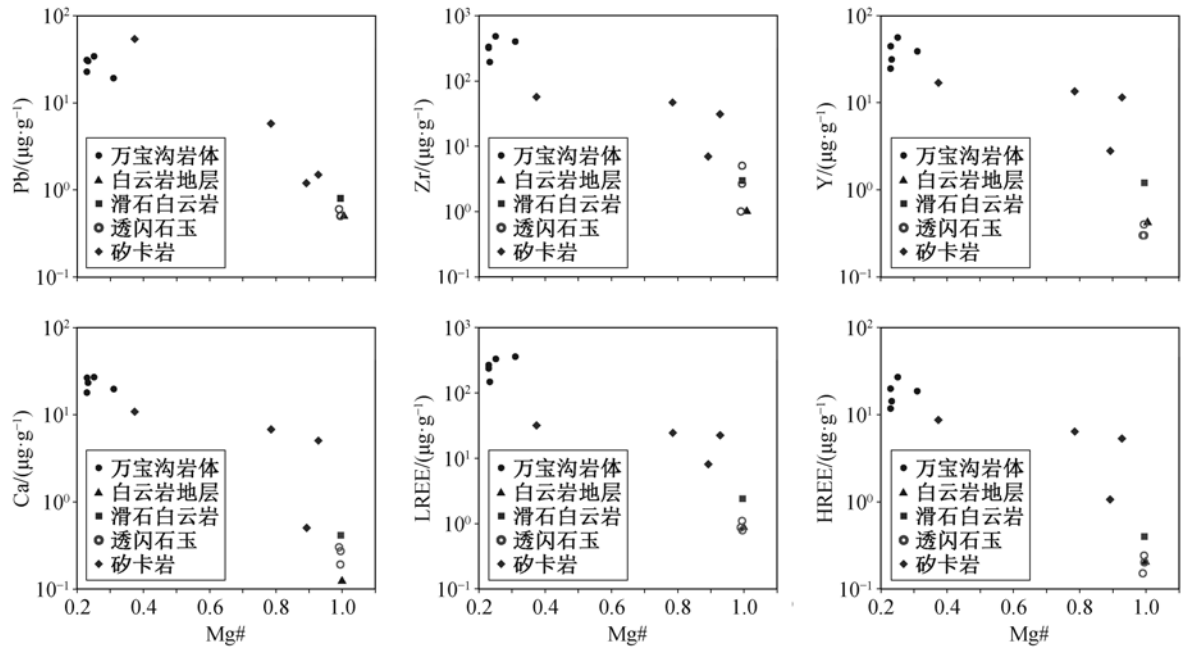


图 9 九八沟矿区各类岩石的全岩 Mg#与主量元素及微量元素相关性图解

Fig. 9 Correlation diagram of Mg# and major and trace elements in all types of whole rock in Jiubagou deposit

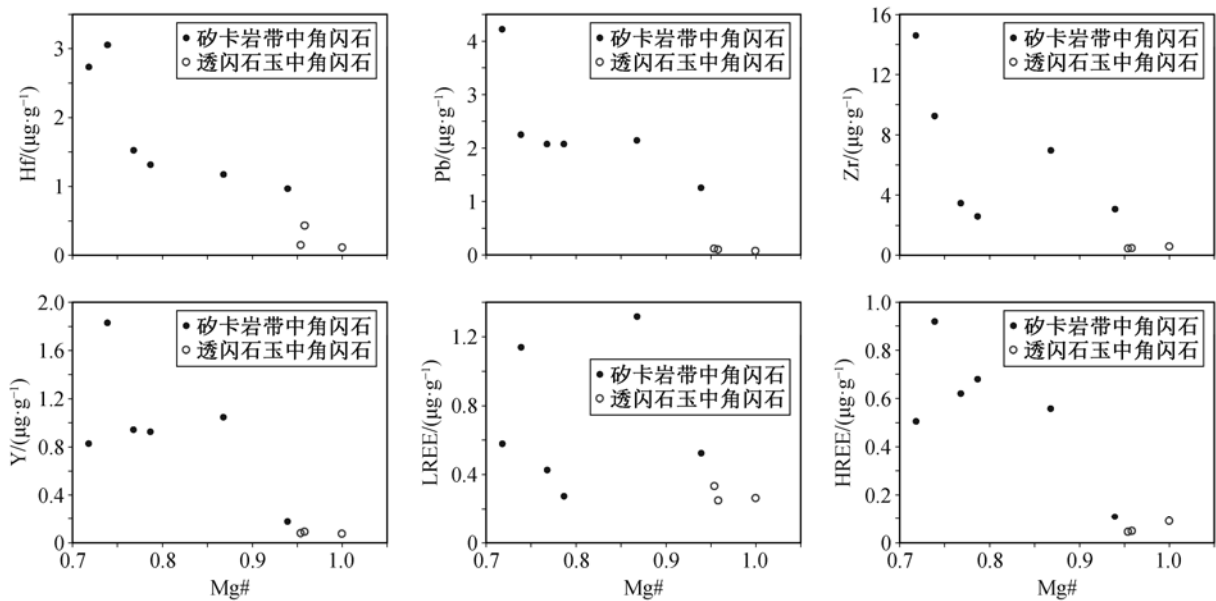


图 10 九八沟矿区角闪石类矿物 Mg#与微量元素相关性图解

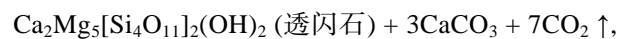
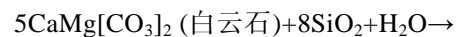
Fig. 10 Correlation diagram of Mg# and trace elements in amphiboles in Jiubagou deposit

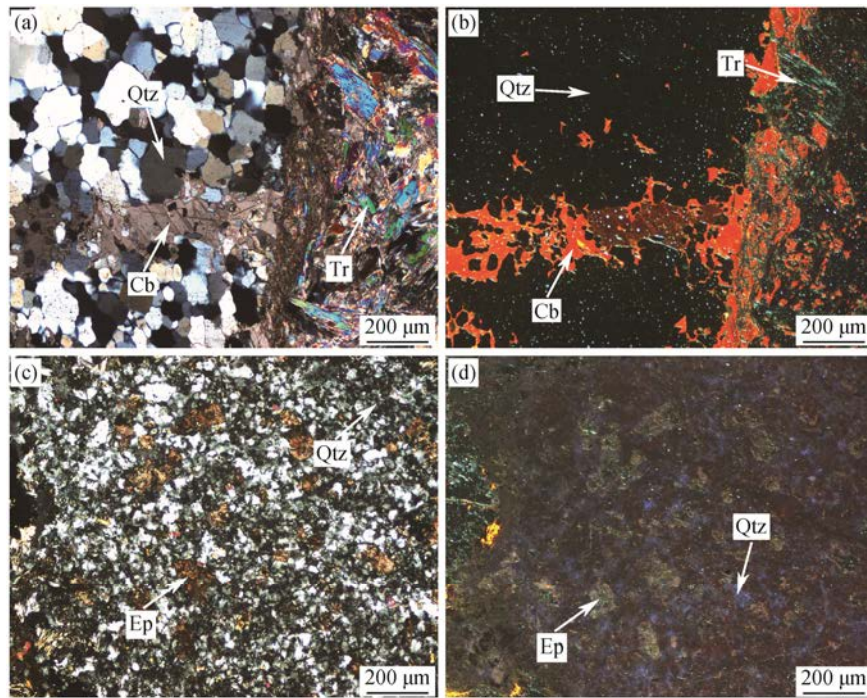
因此,可以推论玉石中石英为地层中硅质团块重结晶作用的产物,而非岩浆热液交代作用所致。

综合上述分析结果,鉴于透闪石玉矿床的成矿元素几乎全部来源于围岩,可将九八沟透闪石玉矿成因类型确定为岩浆接触热变质型矿床。通过接触热变质作用形成早期细粒透闪石后,又经历区域动

力变质作用,透闪石内部破裂,局部发生重结晶形成粗粒集合体。

透闪石为白云石和硅质团块经变质反应形成。





(a)为与透闪石共生的石英正交偏光显微照片;(b)为与(a)同视域的 CL 图像;(c)为石榴石矽卡岩中石英的正交偏光显微照片;(d)为与(c)同视域 CL 图像。Tr: 透闪石; Qtz: 石英; Cb: 碳酸盐矿物; Ep: 绿帘石

图 11 玉石和石榴石矽卡岩中石英的正交偏光显微图像和 CL 图像

Fig. 11 Microscopic image and CL image of quartz from tremolite jade and garnet skarn

该反应方程与玉石中缺乏其他硅酸盐矿物的现象相符。岩浆热液体系中 Fe^{2+} 和早期富铁硅酸盐矿物(钙铁榴石和辉石等)抑制透闪石的生成,转而形成含Fe的阳起石。昆仑山西段阿拉玛斯透闪石玉矿的矿物和岩石化学特征^[28-30]与九八沟矿床相似,其成矿作用是否为相同的成因类型值得进一步探究。

5 九八沟透闪石玉的成矿条件和找矿方向

5.1 成矿条件

九八沟透闪石玉矿床是一种岩浆接触热变质型矿床,其形成受地层岩性、构造和岩浆条件控制。

1) 赋矿围岩提供各成矿元素,岩浆热液抑制透闪石形成,故围岩应为富Ca、Mg和Si的白云岩,玉矿的空间分布与地层中硅质团块密切相关。

2) 九八沟透闪石玉矿床的形成受局部构造条件制约,裂隙、破裂和微细热液通道的发育导致强烈的热液蚀变,不利于玉矿的形成,因此位于接触带的裂隙不发育的厚层块状地层中更易形成玉矿。

3) 岩体提供热源,故玉矿总是分布在岩体和地层接触带附近一定范围。

5.2 找矿方向

在矿区附近,找矿方向比较明确,围绕万宝沟岩体和围岩接触带,寻找围岩构造裂隙不发育、热液蚀变弱的万宝沟群硅质团块白云岩。在东昆仑地区,中元古界万宝沟群碳酸盐岩地层广泛分布,下元古界金水口群碳酸盐岩地层也具备成矿条件。

该区侵入体以中酸性岩基为主,除万宝沟岩体等少量加里东期岩体外,还有大量华力西期-印支期岩体。扩大找矿区域应围绕这些侵入体与碳酸盐岩地层的接触带展开,避开裂隙和强烈矽卡岩化区域,以滑石和富镁金云母等富镁贫铁矿物为标志。

6 结论

1) 九八沟中酸性侵入体的年龄为 $427.1 \pm 4.7 \text{ Ma}$,岩体侵入万宝沟群硅质团块白云岩导致接触部位形成透闪石玉矿,玉矿的形成时代为早志留世。

2) 九八沟矿区透闪石玉矿体形成于岩浆接触热变质作用,岩浆只提供热源,不提供成矿物质。早期经接触热变质作用形成的毛毡状或纤维交织结构细粒透闪石受区域应力作用,局部发生重结晶形成粗粒透闪石集合体。

3) 该矿区找矿重点应关注万宝沟岩体与含硅质白云岩接触部位, 避开裂隙及矽卡岩发育部位。

致谢 感谢青海省格尔木埃玛山川矿业有限公司的帮助和北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室老师对实验的大力支持。

参考文献

- [1] Harlow G E, Sorenesn S S. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: metasomatic connections. *International Geology Review*, 2005, 47(2): 113–146
- [2] 毕思远. 青海格尔木纳赤台软玉的玉石学特征及成因分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015
- [3] 于海燕, 阮青锋, 廖宝丽, 等. 青海不同矿区软玉地球化学特征及 Ar-Ar 定年研究. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(4): 655–668
- [4] 杨天翔, 杨明星, 刘虹靓, 等. 东昆仑三岔河软玉矿床成因的新认识. *桂林理工大学学报*, 2013, 33(2): 239–245
- [5] 王建军, 甘艳辉, 李健, 等. 大灶火玉石矿成矿条件及找矿远景分析. *高原地震*, 2007, 19(4): 47–51
- [6] 雷成. 东昆仑小灶火软玉矿床成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2016
- [7] 张喜全, 刘久波, 刘具仓, 等. 小灶火地区昆仑玉矿地质特征及成因. *现代矿业*, 2011, 27(4): 56–58
- [8] 潘彤. 青海省东昆仑钴矿成矿系列研究[R]. 西宁: 青海省有色地质矿产勘查局, 2005
- [9] 蔡雄飞, 魏启荣, 罗中杰, 等. 东昆仑中段地层学研究的新进展. *资源调查与环境*, 2009, 30(4): 243–254
- [10] 董必谦. 青海省格尔木玉地质简况及玉石特征. *建材地质*, 1996(5): 23–28
- [11] 杨先仁, 赵文亮, 王君杰, 等. 东昆仑地区软玉矿成矿地质特征及成矿预测. *青海国土经略*, 2012(3): 39–42
- [12] Feng C Y, Qu W J, Zhang D Q, et al. Re-Os dating of pyrite from the Tuolugou stratabound Co (Au) deposit, Eastern Kunlun Orogenic Belt, northwestern China. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36(10): 213–220
- [13] 杨经绥, 许志琴, 马昌前, 等. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题. *中国地质*, 2010, 37(1): 1–11
- [14] 张德全, 丰成友, 李大新, 等. 柴北缘-东昆仑地区的造山型金矿床. *矿床地质*, 2001, 20(2): 137–146
- [15] Chen N S, Sun M, Wang Q Y, et al. U-Pb dating of zircon from the Central Zone of the East Kunlun Orogen and its implications for tectonic evolution. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(7): 929–938
- [16] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 403–414
- [17] 阿成业, 王毅智, 任晋祁, 等. 东昆仑地区万保沟群的解体及早寒武世地层的新发现. *中国地质*, 2003, 30(2): 199–206
- [18] 邓红宾, 陈永东, 杨鹏涛, 等. 东昆仑纳赤台地区构造时空格架及成矿地质背景分析. *中国地质调查*, 2019, 6(2): 34–41
- [19] Dorling M, Zussman J. An investigation of nephrite jade by electron microscopy. *Mineralogical Magazine*, 1985, 49: 31–36
- [20] 中-英青藏高原综合地质考察队. 青藏高原地质演化. 北京: 科学出版社, 1990
- [21] 王晓霞, 胡能高, 王涛, 等. 柴达木盆地南缘晚奥陶世万宝沟花岗岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2950–2962
- [22] 邓红宾, 魏华财, 姚波, 等. 东昆仑纳赤台北花岗岩闪长岩体地球化学特征及钨锡找矿潜力. *现代矿业*, 2017, 33(12): 33–38
- [23] Schumacher J C. 角闪石电子探针分析数据中三价铁比值的估算. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(2): 189–198
- [24] Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *European Journal of Mineralogy*, 1997, 61: 295–310
- [25] 刘劲鸿. 角闪石成因矿物族及其应用. *长春地质学院学报*, 1986(1): 41–48
- [26] 王英华. 阴极发光技术在地质学中的应用. 北京: 地质出版社, 1990
- [27] 宋志敏. 阴极发光地质学基础. 北京: 中国地质大学出版社, 1993
- [28] 唐延龄, 陈葆章, 蒋壬华, 等. 中国和阆玉. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2005: 213–214
- [29] Liu Y, Deng J, Shi G H, et al. Chemical zone of nephrite in Alamas, Xinjiang, China. *Resource Geology*, 2010, 60(3): 249–259
- [30] Liu Y, Deng J, Shi G H, et al. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(5): 440–451