

西藏尕尔勤铜矿床花岗闪长斑岩地球 化学特征及成矿作用研究

何阳阳^{1,2}, 温春齐², 刘显凡²

(1. 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川 内江 641112;

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 对尕尔勤铜矿床花岗闪长斑岩及其锆石的稀土元素进行了分析, 并对其成矿作用进行了研究。结果表明, 花岗闪长斑岩稀土元素总含量变化范围不大 ($\Sigma\text{REE} = 48.64 \times 10^{-6} \sim 78.12 \times 10^{-6}$), $\text{LREE}/\text{HREE} = 8.67 \sim 11.68$, 所有样品都呈轻稀土元素相对富集、重稀土元素亏损的右倾型分配模式; δEu 由弱负异常 $\rightarrow$ 弱正异常演化, 这是因为地幔底辟作用引发地壳部分重熔形成长英质岩浆的过程中, 逐步削弱了结晶分异导致的负 Eu 异常进而出现弱的正 Eu 异常。锆石具有典型的振荡环带, 稀土总量较高 ($\Sigma\text{REE} = 735.78 \times 10^{-6} \sim 6792.10 \times 10^{-6}$), 相对亏损轻稀土, 富集重稀土, 正 Ce 异常明显, 并呈现弱的负 Eu 异常, 这是因为在地幔流体作用下, 重稀土元素及 Ce 较其它轻稀土元素更容易进入锆石晶格所致, Eu 呈弱的负异常则是成岩后期岩体受氧化淋滤所致。综合分析, 揭示出地幔流体作用导致花岗闪长斑岩具有壳幔混染甚至成矿特征, 同时还能透过岩浆与围岩发生物质和能量的交换, 导致变质砂岩成矿的成因机制。

关键词: 花岗闪长斑岩; 锆石; 稀土元素; 尕尔勤; 西藏

中图分类号: P588.121; P618

文献标识码: A

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF GRANODIORITE PORPHYRY AND MINERALIZATION STUDY IN THE GAERQIN COPPER DEPOSIT, TIBET

HE Yangyang^{1,2}, WEN Chunqi², Liu Xianfan²

(1. School of Geography and Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641112, Sichuan, China;

2. Geosciences College of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The rare earth elements (REEs) in granodiorite porphyry and zircon from the Gaerqin copper deposit of Tibet, China, were geochemically traced, and the mineralization was also studied. The total levels of REEs in granodiorite porphyry varied slightly ($\Sigma\text{REE} = 48.64 \times 10^{-6} \sim 78.12 \times 10^{-6}$) with $\text{LREE}/\text{HREE} = 8.67 \sim 11.68$. All samples were featured by a right-leaning distribution with enrichment in light REEs (LREEs) and depletion in heavy REEs (HREEs), δEu changed from weak negative anomaly to weak positive anomaly, which is due to the gradual weakening of negative Eu anomalies caused by crystallization differentiation and a weak positive Eu anomaly in the process of the partially

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目 (201011013); 四川省教育厅科研项目 (17ZB0223)

作者简介: 何阳阳 (1984-), 男, 博士, 主要从事矿床学及区域成矿学研究。E-mail: yangyang_he@qq.com

通讯作者: 温春齐 (1945-), 男, 教授, 主要从事矿床学及区域成矿学研究。E-mail: wcq@cduet.edu.cn

收稿日期: 2017-07-09; **修回日期:** 2018-05-20

吴芳编辑

remelting growth of the angled magma in the crust. The zircon was found with typical oscillatory zones, large total REE levels ($\Sigma\text{REE} = 735.78 \times 10^{-6} \sim 6792.10 \times 10^{-6}$), LREE depletion, HREE enrichment, evident Ce positive anomaly and weak negative Eu anomaly. This is because under the action of mantle fluid, heavy rare earth elements and Ce are more likely to enter the lattice of zircon than other light rare-earth elements. The weak negative abnormality of Eu is caused by oxidation and leaching of the late diagenetic rock mass. Comprehensive analysis reveals that the mantle fluid action endowed the granodiorite porphyry with the characteristics of crust-mantle mixing or even ore-formation. Meanwhile, the matter-energy exchange between magma and surrounding rocks accounted for the metamorphic sandstone ore-formation.

Key words: granodiorite porphyry; zircon; rare earth elements; Gaerqin; Tibet

0 引言

锆石在岩石中的体积分数通常小于 0.1%, 但锆石中的 U、Th 以及 REE 等是限定源岩性质和形成过程非常重要的示踪元素, 携带了许多地质信息, 因而成为应用最为广泛的副矿物之一^[1-2]。近年来, 锆石的 U-Pb 同位素测年、Hf 同位素及稀土、微量元素等方面的研究成为了热点^[3-5]。

尕尔勤铜矿床的发现为多龙矿集区注入了新鲜的血液, 其矿区地理坐标: 东经 $83^{\circ}41'00''$ — $83^{\circ}44'00''$, 北纬 $32^{\circ}49'00''$ — $32^{\circ}50'15''$, 面积约 10.82 km^2 , 隶属于西藏阿里地区^[6]。该区具有巨大的找矿潜力, 但研究程度却很低, 取得的科研成果也十分有限。林彬等^[7]对尕尔勤矿区枕状玄武岩进行了研究, 认为其为早二叠世地幔柱集中侵位的产物。张志等^[8]对尕尔勤矿区含矿花岗闪长斑岩进行了研究, 认为其来源于俯冲洋壳的部分熔融。结合部分学者研究成果, 从稀土元素的角度出发, 深入研究和查明该矿床主要赋矿岩石花岗闪长斑岩及单颗粒锆石的稀土元素特征, 对于指示锆石的生长环境及熔体或流体的化学组成具有重要意义。

1 矿床地质特征

尕尔勤铜矿床大地构造位置隶属于羌塘地块南缘, 班公湖—怒江缝合带西段^[9-10] (见图 1a)。其矿床地质特征包括矿区地质和矿床特征两部分, 如下所述。

矿区出露地层主要有: 下侏罗统曲色组第一岩性段, 代号为 J_1q^1 ; 矿区大量出露该地层, 厚度大于 2 km, 主要岩性为变长石石英砂岩, 常呈浅

灰白色, 地层中部有花岗闪长斑岩侵入。下侏罗统曲色组第二岩性段, 代号为 J_1q^2 ; 该地层主要出露于矿区北部, 厚度大于 2 km, 主要岩性为变长石石英砂岩, 常呈浅黄褐色, 与美日切组地层呈角度不整合接触。下白垩统美日切组下段, 代号为 K_1m^1 ; 出露于矿区北部, 厚度大于 200 m, 主要岩性为安山岩, 常呈紫红色 (见图 1b)。

矿区构造较为发育, 部分断层控矿。其中 F_1 断层规模最大, 宽约 160 ~ 220 m, 呈近东西向展布, 走向为 $280^{\circ} \sim 290^{\circ}$, 断层面北倾, 倾角为 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$; 该断层具有多期活动特征, 早期表现为塑性流动变形, 晚期见张扭性特征; 该断层含矿, 断裂带中含热液活动期的石英、黄铜矿、黄铁矿等矿物。 F_4 断层为一逆断层, 不含矿, 它贯穿于矿区北部, 长度大于 10 km, 宽约 50 m, 倾向为 SW, 倾角约 $65^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 形成时间较晚, 将 F_1 断层错断; 破碎带中可见断层泥等。

矿区花岗闪长斑岩 ($\gamma\delta\pi_3^3$): 主要出露于矿区南部偏西地段, 呈略不规则圆形, 面积约 0.1 km^2 , 与围岩呈侵入接触关系。安山 (玢) 岩: 矿区北部均有出露, 具硅化、绢云母化。枕状玄武岩 (ba): 在尕尔勤矿区东北角呈椭圆状出露。细晶花岗岩 (γ_2^3): 出露于矿区中东部, 呈不规则椭圆状展布。

矿体位于尕尔勤矿区 5195 m 高地西南约 400 m, 出露海拔高度 4970 m 左右, 赋存于花岗闪长斑岩体及岩体与下侏罗统曲色组地层变质砂岩接触带中; 与成矿有关的蚀变主要有角岩化、硅化、钾化和绢英岩化等; 矿体由两部分组成 (见图 1b), 一部分为花岗闪长斑岩体, 另一部分为靠近岩体的变质砂岩。矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、孔雀石、蓝铜矿, 次为辉钼矿、斑铜矿、闪锌矿、磁铁矿、赤铁矿等; 脉石矿物主要为钾长石、石

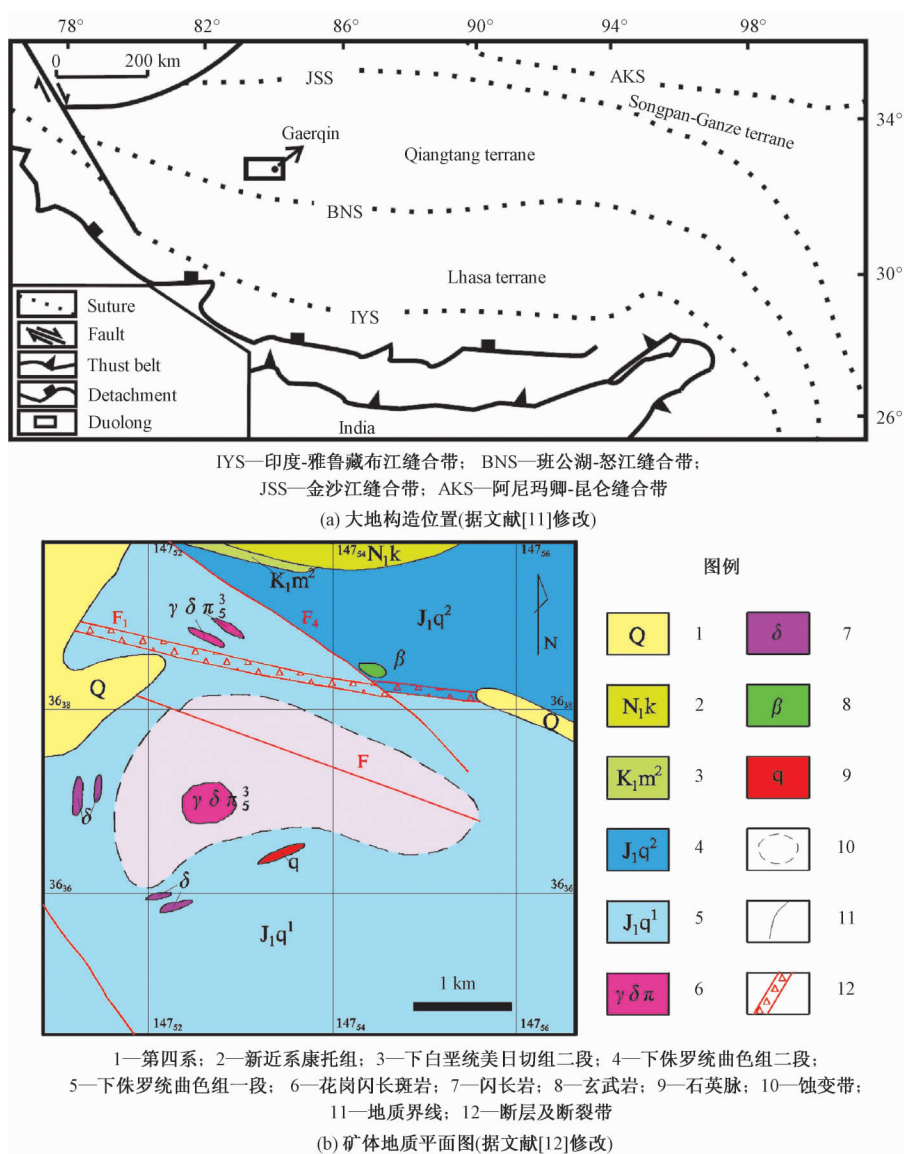


图 1 尔勤铜矿床大地构造位置及矿体平面图

Fig. 1 Geotectonic location and ore body plan of the Gaergin porphyry copper deposit

英、绢云母、微量铁碳酸盐等。浸染状构造、细脉浸染状构造、块状构造等为矿区主要的矿石构造；自形粒状结构、半自形粒状结构以及它形粒状结构等为矿区主要的矿石结构。

围岩蚀变范围受岩体规模的控制, 岩体规模越大蚀变越强、距岩体越近蚀变越强, 远离岩体逐渐减弱或消失。接触带蚀变分带表现为: 由岩体向围岩依次分为钾硅化带—云英岩化带—褐铁矿化带—角闪岩带。

2 样品特征

花岗闪长斑岩为尕尔勤铜矿床的主要赋矿岩

石之一，矿区含矿斑岩规模较大，岩体与围岩的内外接触带部位，铜品位有增高的特征。斑晶和基质是花岗闪长斑岩的两个重要组成部分（见图2），其中，斑晶所占比例约为35%~40%，基质占整个岩石的比例约为60%~65%。斑晶的构成主要为60%左右的斜长石，30%左右的石英，5%左右的钾长石，3%左右的角闪石，2%左右的黑云母。基质主要为花岗结构、粒晶结构等^[10]。

CL 图像能显示出锆石内部结构, 同时可以反映出锆石成长过程的形态变化规律^[13]。委托西北大学大陆动力学国家重点实验室完成阴极发光照相 (见图 3), 所分选出来的锆石无色透明, 并呈长柱状, 其长轴长度介于 $100 \sim 350 \mu\text{m}$ 之间, 长

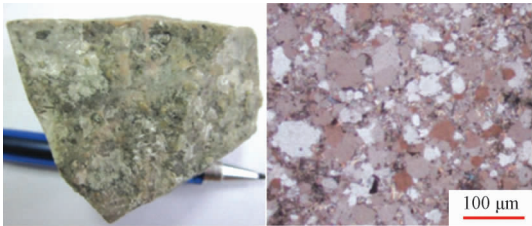


图2 花岗闪长斑岩手标本及镜下照片

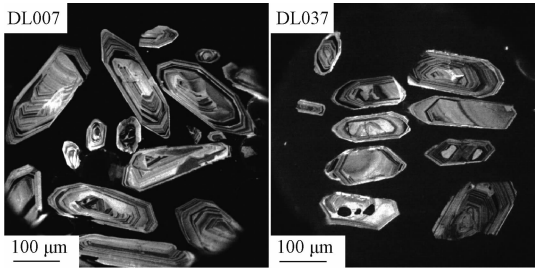


图3 代表性锆石阴极发光图像

Fig.2 Manual samples and microscopic photographs of granodiorite porphyry

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of typical zircons

轴与短轴之比介于2:1~3.5:1,具有震荡环带特征,为典型的同源岩浆锆石^[14],暗示锆石中稀土元素的空间分布并不均匀^[15]。

3 测试结果及分析

3.1 花岗闪长斑岩

选取5件花岗闪长斑岩样品进行稀土元素测

试,西南冶金地质测试中心承担此项工作,采用DY938 X射线光谱仪和管式燃烧炉等仪器完成,测试结果及相关参数见表1和表2,绘制的花岗闪长斑岩稀土元素标准化图解见图4(地幔标准化值据文献[16])。

尕尔勤斑岩铜矿床花岗闪长斑岩稀土元素(REE)总含量在 $48.64 \times 10^{-6} \sim 78.12 \times 10^{-6}$ 之间变化,变动幅度较小, $LREE/HREE = 8.67 \sim 11.68$

表1 花岗闪长斑岩稀土元素测试分析表 (×10⁻⁶)

Table 1 Test analysis table for rare earth elements of granodiorite porphyry

序号	样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	DL025	花岗闪长斑岩	17.6	34.5	3.77	12.9	2.57	0.62	1.86	0.28	1.56	0.33	0.93	0.13	0.92	0.15
2	DL027	花岗闪长斑岩	14.4	26.2	2.86	10.4	1.87	0.58	1.44	0.24	1.36	0.27	0.82	0.11	0.80	0.14
3	DL031	花岗闪长斑岩	16.0	30.0	3.19	11.6	2.19	0.59	1.63	0.26	1.49	0.32	0.87	0.12	0.85	0.14
4	DL033	花岗闪长斑岩	14.1	22.1	2.56	9.16	1.76	0.50	1.34	0.24	1.47	0.34	1.00	0.15	1.03	0.17
5	DL037	花岗闪长斑岩	10.5	20.9	2.32	7.79	1.60	0.50	1.22	0.22	1.34	0.30	0.86	0.12	0.83	0.14

表2 花岗闪长斑岩稀土元素相关参数计算

Table 2 Rare earth elements related parameter calculation of granodiorite porphyry

序号	样号	LREE	HREE	L/H	ΣREE	La/Yb	Sm/Nd	Eu/Sm	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δCe	δEu
1	DL025	71.96	6.16	11.68	78.12	19.13	0.20	0.24	4.31	1.63	0.97	0.83
2	DL027	56.31	5.18	10.87	61.49	18.00	0.18	0.31	4.84	1.45	0.93	1.04
3	DL031	63.57	5.68	11.19	69.25	18.82	0.19	0.27	4.60	1.55	0.95	0.92
4	DL033	50.18	5.74	8.74	55.92	13.69	0.19	0.28	5.04	1.05	0.82	0.96
5	DL037	43.61	5.03	8.67	48.64	12.65	0.21	0.31	4.13	1.19	0.98	1.05

(见表2),所有样品都呈现出轻稀土元素(LREE)相对富集、重稀土元素(HREE)亏损的右倾型分配模式(见图4);轻稀土富集指示长英质岩浆源自地幔底辟作用引发地壳重熔^[17];样品的δEu表现由弱负异常→弱正异常演化,指示含矿地幔流体伴随岩浆结晶成岩过程交代岩石成矿^[18~19],在这一过程中减弱或抵消结晶分异作用形成的负铕异常,进而逐步形成正铕异常;这一稀土元素特征,是其成岩成矿过程经历由原始岩浆作用→含矿地幔流体作用,进而促进充填交代,促使壳幔物质之间发生相互混染的证据^[20~21]。

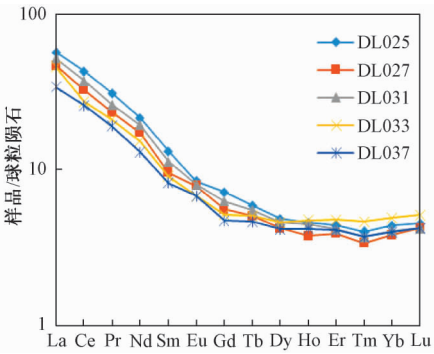


图4 尕尔勤花岗闪长斑岩稀土元素标准化图解
Fig.4 Standardization diagram of rare earth elements in granodiorite porphyry

3.2 单颗粒锆石

锆石样品按常规重力和磁选方法分选，利用双目实体显微镜挑选出晶型比较完整的无色透明长柱状锆石颗粒来制作样靶，采用环氧树脂固定，固化后进行抛光处理，使其表面暴露，用于阴极发光（CL）研究。锆石稀土元素测试单位为西北

大学大陆动力学国家重点实验室，采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪（LA-ICP-MS）完成，测试结果及相关参数如表 3 所示（文中的稀土元素结果经过了同位素测年结果的筛选），绘制的锆石稀土元素标准化图解如图 5 所示（地幔标准化值据文献 [16]）。

表 3 单颗粒锆石稀土元素 LA-ICP-MS 分析结果（ $\times 10^{-6}$ ）
Table 3 LA-ICP-MS Rare earth elements data of single grain zircon

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	L/H	δCe	δEu	(La/Sm) _N	(Lu/Gd) _N
DL007-01	0.01	59.02	0.09	2.30	5.31	2.62	36.16	13.75	182.22	78.35	402.64	97.23	1045.11	246.87	2171.69	0.03	191.74	0.43	0.00	53.26
DL007-02	0.03	31.64	0.06	0.91	2.67	1.43	18.09	7.30	102.66	47.24	252.58	65.34	739.84	190.28	1460.06	0.03	135.78	0.47	0.01	82.05
DL007-03	0.00	33.44	0.09	1.47	2.68	1.64	21.26	8.02	108.37	50.00	271.72	70.18	784.29	202.28	1555.43	0.03	115.61	0.46	0.00	74.22
DL007-04	0.14	34.74	0.14	2.04	4.12	1.93	24.68	8.94	117.70	51.36	268.49	64.81	738.05	182.95	1500.08	0.03	55.19	0.45	0.02	57.82
DL007-05	0.09	30.17	0.05	0.77	2.12	0.84	10.44	4.20	54.58	23.55	126.01	31.69	360.45	90.83	735.78	0.05	112.33	0.45	0.03	67.84
DL007-06	0.05	44.08	0.10	1.67	4.18	2.13	25.24	9.55	133.92	59.79	317.80	81.66	917.62	231.11	1828.90	0.03	112.90	0.49	0.01	71.43
DL007-07	0.00	54.70	0.02	2.52	6.76	2.50	51.08	20.50	266.22	115.58	563.37	128.20	1301.24	284.79	2797.46	0.02	842.78	0.29	0.00	43.49
DL007-08	1.15	34.40	0.32	2.01	3.02	1.52	18.16	6.86	90.41	40.55	212.63	54.12	616.05	154.21	1235.41	0.04	13.56	0.48	0.24	66.26
DL007-09	0.21	45.81	0.17	2.05	5.32	2.12	25.53	8.67	117.42	49.28	248.21	59.33	657.05	157.01	1378.16	0.04	55.36	0.46	0.03	47.98
DL007-10	0.00	44.55	0.03	1.65	4.87	1.50	33.87	14.51	204.75	93.72	486.29	121.06	1284.51	297.99	2589.30	0.02	392.23	0.26	0.00	68.64
DL007-11	0.12	36.32	0.14	2.06	3.37	1.68	19.76	7.44	99.80	45.95	239.97	62.10	708.75	179.06	1406.49	0.03	58.88	0.49	0.02	70.70
DL007-12	0.00	29.23	0.02	0.76	1.63	1.10	11.85	4.56	61.93	28.16	145.71	37.17	423.29	106.68	852.09	0.04	438.10	0.55	0.00	70.25
DL007-13	0.02	58.84	0.17	1.87	6.29	2.34	41.59	15.86	207.85	89.80	455.47	111.93	1224.45	290.68	2507.15	0.03	101.28	0.33	0.00	54.52
DL007-14	0.00	49.55	0.06	1.58	4.19	1.70	28.27	10.72	137.70	61.17	312.84	78.16	843.54	204.64	1734.13	0.03	232.58	0.35	0.00	56.46
DL007-15	0.00	34.94	0.07	1.35	3.52	1.05	20.49	7.88	107.96	47.01	241.11	59.16	645.20	155.05	1324.77	0.03	153.61	0.29	0.00	59.03
DL007-16	0.03	28.77	0.07	0.88	2.49	1.35	16.95	7.66	110.24	50.74	278.10	71.44	817.01	208.43	1594.16	0.02	107.11	0.47	0.01	95.94
DL007-17	0.00	43.72	0.06	1.18	4.43	1.51	28.37	11.69	151.42	65.62	337.43	80.66	860.27	199.28	1785.63	0.03	232.02	0.31	0.00	54.80
DL007-18	0.00	30.62	0.07	1.60	1.21	1.09	14.43	5.90	76.41	33.53	176.18	44.34	510.97	127.88	1024.23	0.03	127.90	0.48	0.00	69.12
DL007-19	0.06	157.53	0.23	4.36	13.64	4.84	124.32	51.03	697.12	291.49	1391.49	312.44	3078.32	665.23	6792.10	0.03	190.58	0.24	0.00	41.75
平均值	0.10	46.43	0.10	1.74	4.31	1.84	30.03	11.84	159.40	69.62	354.11	85.84	924.00	219.75	1909.11	0.03	193.13	0.41	0.02	63.45
DL037-1	0.65	84.65	0.28	4.39	8.55	4.12	49.82	17.45	210.57	90.52	446.45	105.82	1119.54	270.40	2413.20	0.04	47.93	0.47	0.05	42.34
DL037-2	0.00	37.92	0.06	1.42	3.81	1.65	27.82	10.69	145.48	60.11	310.51	75.20	801.92	194.14	1670.72	0.03	208.11	0.35	0.00	54.45
DL037-3	0.04	47.72	0.16	1.91	5.48	1.91	38.09	16.12	224.18	94.36	486.35	116.40	1235.91	290.14	2558.77	0.02	83.57	0.30	0.00	59.42
DL037-4	0.12	44.66	0.16	3.26	7.59	2.43	56.88	23.76	297.69	122.89	605.45	137.09	1385.14	305.45	2992.56	0.02	64.78	0.26	0.01	41.89
DL037-5	0.03	39.13	0.04	1.42	4.09	2.01	26.92	9.70	130.52	56.82	304.80	74.86	846.32	210.87	1707.53	0.03	220.54	0.44	0.00	61.11
DL037-8	0.34	33.20	0.46	4.17	3.89	2.56	17.17	7.03	88.12	39.45	208.20	54.36	623.82	160.12	1242.90	0.04	16.87	0.81	0.05	72.73
DL037-9	0.00	135.15	0.27	4.35	14.12	7.35	73.10	26.19	324.32	135.07	674.09	160.15	1683.28	396.17	3633.63	0.05	148.64	0.56	0.00	42.28
DL037-11	0.06	25.23	0.05	0.70	2.80	1.86	16.69	6.75	92.98	39.89	220.82	56.85	640.45	165.02	1270.14	0.02	97.83	0.64	0.01	77.15
DL037-12	0.00	23.35	0.03	0.78	1.42	0.97	12.54	4.47	60.54	27.95	152.14	40.02	471.96	122.85	919.03	0.03	268.66	0.47	0.00	76.41
DL037-13	0.01	73.97	0.14	3.01	8.59	3.70	42.32	15.00	204.39	88.31	454.27	111.08	1212.54	295.05	2512.38	0.04	158.39	0.48	0.00	54.40
DL037-14	0.00	55.90	0.07	2.08	3.20	2.73	26.26	10.28	140.25	61.14	326.88	82.44	915.89	228.23	1855.36	0.04	225.36	0.63	0.00	67.80
DL037-15	0.00	27.56	0.05	0.61	2.54	1.20	17.99	7.51	106.36	47.02	255.39	66.63	771.96	197.01	1501.82	0.02	159.22	0.40	0.00	85.42
DL037-16	0.13	34.16	0.06	1.05	3.18	1.85	31.36	12.92	170.07	73.29	366.20	86.21	928.32	213.46	1922.24	0.02	94.19	0.37	0.03	53.10
DL037-17	0.00	23.91	0.07	0.72	1.30	1.15	14.31	4.81	70.66	28.34	148.11	36.94	414.00	101.20	845.51	0.03	105.22	0.51	0.00	55.17
DL037-18	0.00	17.09	0.06	0.76	1.73	0.87	12.85	4.65	57.67	27.06	146.53	39.59	433.91	111.44	854.21	0.02	88.54	0.41	0.00	67.64
DL037-19	0.02	28.62	0.04	1.01	2.60	1.47	18.46	7.43	103.07	45.74	245.43	61.79	689.25	174.53	1379.45	0.03	188.32	0.47	0.00	73.75
DL037-20	0.04	30.14	0.05	0.92	1.70	1.11	12.04	4.75	66.60	29.33	159.76	41.30	475.57	118.30	941.62	0.04	143.74	0.55	0.02	76.67
平均值	0.08	44.85	0.12	1.92	4.50	2.29	29.10	11.15	146.67	62.78	324.20	79.22	861.75	209.08	1777.71	0.03	136.47	0.48	0.01	62.45

DL007 锆石 ΣREE 变化范围为 735.78 ~ 6792.10，平均值为 1909.11；ΣLREE/ΣHREE 变化范围为 0.02 ~ 0.05，平均值为 0.03（见表 3）；稀土元素特征总体表现为亏损轻稀土，富集重稀土，呈左倾型配分模式（见图 5）。DL037 锆石 ΣREE 变化范围为 845.51 ~ 3633.63，平均值为

1777.71；ΣLREE/ΣHREE 变化范围为 0.02 ~ 0.05，平均值为 0.03；稀土元素特征亦表现为亏损轻稀土，富集重稀土，呈左倾型配分模式。DL007 样品 δCe 值变化范围为 13.56 ~ 842.78，平均值为 193.13，正 Ce 异常明显，在标准化图解中表现为大的波峰；δEu 值变化范围为 0.24 ~ 0.55，

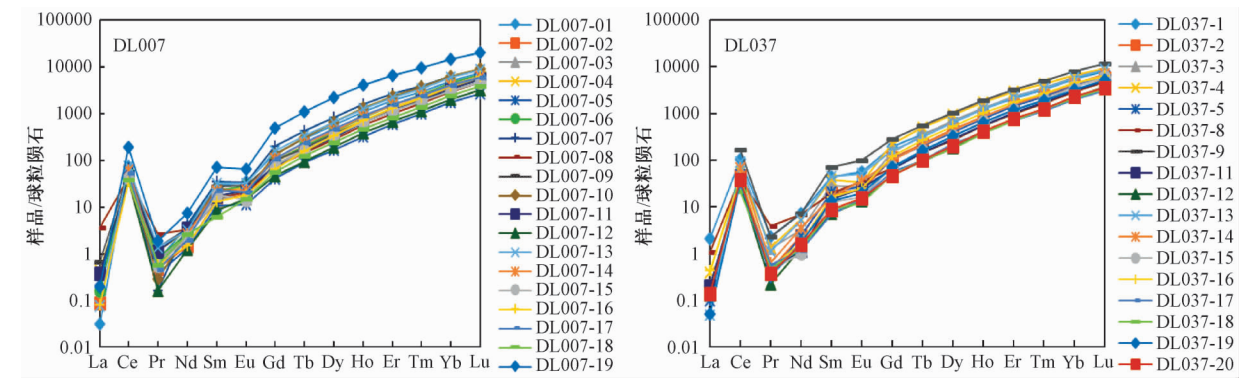


图 5 锆石稀土元素标准化图解

Fig. 5 Standardization diagram of rare earth elements in zircon

平均值为 0.41，呈现负 Eu 异常，在标准化图解中表现为小的波谷。DL037 样品 δCe 值变化范围为 16.87 ~ 268.66，平均值为 136.47，正 Ce 异常明显，在标准化图解中表现为大的波峰； δEu 值变化范围为 0.26 ~ 0.81，平均值为 0.48，呈现负 Eu 异常，在标准化图解中表现为小的波谷。DL007 样品 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值变化范围为 0 ~ 0.24，平均值为 0.02； $(\text{Lu}/\text{Gd})_{\text{N}}$ 值变化范围为 41.75 ~ 95.94，平均值为 63.45。DL037 样品 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值变化范围为 0 ~ 0.05，平均值为 0.01； $(\text{Lu}/\text{Gd})_{\text{N}}$ 值变化范围为 41.89 ~ 85.42，平均值为 62.45。2 个样品均显示轻稀土元素亏损→重稀土元素富集，同时显示 Ce 的正异常和 Eu 的负异常； $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 比值越小，轻稀土部分曲线越陡， $(\text{Lu}/\text{Gd})_{\text{N}}$ 比值越大，重稀土部分越陡，这些均为岩浆锆石的典型特征。

稀土元素的离子半径从 La^{3+} ($1.160 \times 10^{-10} \text{ m}$) 到 Lu^{3+} 开始逐步变小，而 Zr^{4+} 的离子半径 ($0.84 \times 10^{-10} \text{ m}$) 与重稀土元素的离子半径大小较为接近^[2]，这样就导致了离子半径相对过大的轻稀土元素不易进入锆石晶格，而与之离子半径相当的重稀土元素相较而言更容易进入，从而显示出岩浆锆石的特征。 Ce^{3+} ($1.11 \times 10^{-10} \text{ m}$) 能够氧化成 Ce^{4+} ($1.01 \times 10^{-10} \text{ m}$)，此时其离子半径与 Zr^{4+} 或 Hf^{4+} 较为接近^[2]，相较其它轻稀土而言 Ce 更容易进入锆石晶格，从而导致了 Ce 正异常。Eu 在岩浆中通常呈现出 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 两种形式，锆石 Eu 负异常是因为花岗闪长斑岩后期受到氧化淋滤所致。尕尔勤矿区锆石的稀土配分模式在显示强烈地 Ce 正异常时，同时还显示弱的 Eu 负异常，这是地幔流体作用成矿的标志^[17]，其实质是含矿地幔流体作用导致壳幔混染发生的过程。

4 讨论

4.1 岩浆源区及理论依据

林彬等^[7]认为尕尔勤矿区中的玄武岩具有类似 E-MORB^[22]，即富集型大洋中脊拉斑玄武岩的特征；并根据其产出位置以及成岩时代等认为其形成于早二叠世，为地幔柱侵位的产物，与羌塘地体中部的玄武岩成因保持一致。张志等^[8]认为尕尔勤矿区含矿花岗闪长斑岩 SiO_2 含量和 Al_2O_3 含量较大， MgO 含量较低，富 Na 而贫 K，高 Sr、低 Y 和 Yb，大离子亲石元素 (Rb、Th、U、Sr 等) 相对富集，而高场强元素 (Nb、Ta、Ti、P、Zr 等) 相对亏损，具有类似 O 型埃达克岩^[23] 的特征；花岗闪长斑岩体 Hf 同位素组成靠近亏损地幔线，认为其起源于具有幔源性质的深成熔体。花岗闪长斑岩及锆石的稀土元素特征依然显示尕尔勤矿区的成矿物质及流体具有幔源性。

以上特征并非尕尔勤矿区所独有。余宏全等^[24]、Zhou Xiong 等^[25]、Guangchun Fei 等^[26]借助流体包裹体等方面的研究，认为多龙矿集区内典型铜矿床的成矿物质和流体既包含地幔物质又包含地壳物质。符家骏等^[27]基于 Pb-Sr-Nd 同位素研究，认为多龙矿集区内典型铜矿床的成矿物质和流体具有壳幔混染特征。乔东海等^[28]、王松等^[29]基于硫同位素研究，认为多龙矿集区内典型铜矿床的硫主要为深源岩浆硫，硫的来源接近地幔硫。何阳阳等^[30-31]更是借助透岩浆流体成矿理论^[32-33]和地幔流体作用成矿理论^[34]分析了该区典型铜矿床的成因机制，认为其成矿物质和成矿流体具有壳幔混染特征，并提出了多龙矿集区的成矿模型。

姜耀辉等^[35]认为地幔流体成矿作用主要包括4个条件:第1个条件为区域具有深大断裂构造,第2个条件为成矿物质和流体具有幔源特征,第3个条件为幔源岩浆伴随成矿作用进行,第4个条件为形成大型矿集区。尕尔勤铜矿床具备地幔流体成矿作用的条件,主要表现为:矿床位于班公湖—怒江缝合带西段,具有区域深大断裂构造背景;花岗闪长斑岩具有壳幔混染特征,暗示成矿物质和成矿流体具有幔源性;成岩成矿过程中伴有幔源岩浆活动;另外,尕尔勤铜矿床隶属于多龙矿集区,区内还有铁格隆南、多不杂等超大型矿床。尕尔勤铜矿床具有和多不杂铜矿床相近的成岩成矿年龄、相似的矿床特征及流体性质,同样可以运用透岩浆流体成矿理论和地幔流体作用成矿理论来解释其矿床成因。

4.2 成矿过程探讨

班公湖—怒江缝合带的构造演化过程是西藏地质科研工作的热点,尤其是羌塘地块与拉萨地块之间怒江洋盆的碰撞闭合时限及俯冲形式成为了争论的焦点。目前,大多数学者倾向于认为其俯冲形式为南北双向俯冲^[36]。因两大板块之间的碰撞闭合导致了系列地质作用的发生,此时原始地幔→交代富集地幔演化,形成富铜的地幔流体,随后引发地幔底辟,导致部分地壳发生重熔形成长英质岩浆,二者相互混染上升结晶成岩形成花岗闪长斑岩。在这一过程中,长英质岩浆充当含矿地幔流体的载体,同时含矿流体部分溢出岩浆与变长石石英砂岩发生作用,导致变质砂岩含矿。它们结合起来便构成了透岩浆流体成矿理论中的接触带成矿体系。

5 结论

(1) 花岗闪长斑岩具有轻稀土元素(LREE)相对富集、重稀土元素(HREE)相对亏损, δEu 由弱负异常→弱正异常演变的特征。这是因为地幔底辟作用引发地壳部分重熔形成长英质岩浆的过程中,逐步削弱了结晶分异导致的负Eu异常进而出现弱的正Eu异常。

(2) 锆石呈现出明显的振荡环带,且具有稀土总量较高,轻稀土亏损,重稀土富集,正Ce异常明显的特征。这是因为在地幔流体作用下,重稀土元素及Ce较其它轻稀土元素更容易进入锆石

晶格所致,Eu呈弱的负异常则是成岩后期岩体受氧化淋滤所致。

(3) 两大板块之间的碰撞闭合引发系列地质作用,形成含矿地幔流体以及导致部分地壳重熔,二者相互混染结晶成岩形成含矿花岗闪长斑岩的同时,含矿流体部分溢出岩浆与变长石石英砂岩发生作用,导致变质砂岩含矿。

参考文献/References

- [1] 吴福元,李献华,郑永飞,等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23 (2): 185 ~ 220.
WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (2): 185 ~ 220. (in Chinese with English abstract)
- [2] 雷玮琰,施光海,刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. 地学前缘, 2013, 20 (4): 273 ~ 284.
LEI Weiyan, SHI Guanghai, LIU Yingxin. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20 (4): 273 ~ 284. (in Chinese with English abstract)
- [3] Zhang H, Yuan H L, Hu Z C, et al. Characteristics of rare earth elements of zircons from Mesozoic volcanic rocks in Luanping region, Hebei [J]. Journal of Rare Earths, 2005, 23 (5): 588 ~ 595.
- [4] 曹烨,李胜荣,李真真,等. 太行山北段石湖金矿区中生代岩浆岩中单颗粒锆石的稀土元素特征及启示[J]. 中国稀土学报, 2009, 27 (4): 564 ~ 573.
CAO Ye, LI Shengrong, LI Zhenzhen, et al. Characteristics of rare earth elements of zircon from Mesozoic magmatic rocks in Shihu gold district, north Taihang mountain, north China [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2009, 27 (4): 564 ~ 573. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王亚伟,刘良,廖小莹,等. 秦岭杂岩清油河斜长角闪岩多期变质的证据——来自锆石微量元素和包裹体的启示[J]. 岩石学报, 2016, 32 (5): 1467 ~ 1492.
WANG Yawei, LIU Liang, LIAO Xiaoying, et al. Multi-metamorphism of amphibolite in the Qinling complex, Qingyouhe area: Revelation from trace elements and mineral inclusions in zircons [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32 (5): 1467 ~ 1492. (in Chinese with English abstract)
- [6] 方向,丁帅,王艺云,等. 西藏多龙矿集区尕尔勤铜金矿区成矿潜力预测[J]. 矿床地质, 2014, 33 (S1): 1005 ~ 1006.
FANG Xiang, DING Shuai, WANG Yiyun, et al. Prediction of metallogenic potential in the Gaerqin copper-gold deposit in the Duolong Ore Concentration Area, Tibet [J]. Mineral Deposits, 2014, 33 (S1): 1005 ~ 1006. (in Chinese with English abstract)
- [7] 林彬,唐菊兴,宋扬,等. 藏北多龙矿集区尕尔勤枕状玄武

- 岩地球化学及 SHRIMP 测年 [J]. 地球学报, 2017, 38 (5): 702 ~ 710.
- LIN Bin, TANG Juxing, SONG Yang, et al. Petrogeochemistry and SHRIMP dating of Ga'erqin pillow basalt in Duolong, northern Tibet [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38 (5): 702 ~ 710. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张志, 方向, 唐菊兴, 等. 西藏多龙矿集区尕尔勤斑岩铜矿床年代学及地球化学——兼论硅帽的识别与可能的浅成低温热液矿床 [J]. 岩石学报, 2017, 33 (2): 476 ~ 494.
- ZHANG Zhi, FANG Xiang, TANG Juxing, et al. Chronology, geochemical characteristics of the Ga'erqin porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area in Tibet and discussion about the identification of the lithoscaps and the possible epithermal deposit [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33 (2): 476 ~ 494. (in Chinese with English abstract)
- [9] 祝向平, 陈华安, 马东方, 等. 西藏多不杂斑岩铜金矿床地质与蚀变 [J]. 地质与勘探, 2012, 48 (2): 199 ~ 206.
- ZHU Xiangping, CHEN Huaan, MA Dongfang, et al. Geology and alteration of the Duobuza porphyry copper-gold deposit in Tibet [J]. Geology and Exploration, 2012, 48 (2): 199 ~ 206. (in Chinese with English abstract)
- [10] 何阳阳, 温春齐, 刘显凡, 等. 西藏多不杂铜矿区曲色组砂岩化学组分特征及构造背景 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2014, 41 (1): 113 ~ 118.
- HE Yangyang, WEN Chunqi, LIU Xianfan, et al. Chemical component characteristics and tectonic setting of sandstone from quse group in Duobuza copper deposit, Tibet, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41 (1): 113 ~ 118. (in Chinese with English abstract)
- [11] Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene East-west extension in southern Tibet [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 220: 139 ~ 155.
- [12] 陈红旗, 张天平, 李玉昌, 等. 西藏班公湖 - 怒江成矿带西段铜多金属资源调查报告 [R]. 拉萨: 西藏自治区地质调查院, 2011.
- CHEN Hong-qi, ZHANG Tian-ping, LI Yu-chang, et al. Resources investigation report of Copper polymetallic in the Western Bangonghu-Nujiang Metallogenic Belt, Tibet [R]. Lhasa: Geological Survey of Tibet Autonomous Region, 2011. (in Chinese)
- [13] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: examples from eastern Australian granitoids [J]. Journal of Petrology, 2006, 47 (2): 329 ~ 353.
- [14] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. 科学通报, 2004, 49 (16): 1589 ~ 1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (16): 1589 ~ 1604. (in Chinese with English abstract) (未找到本条文献英文信息, 请核对)
- [15] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53 (1): 27 ~ 62.
- [16] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. Developments in Geochemistry, 1984, 2: 63 ~ 114.
- [17] 何阳阳, 温春齐, 刘显凡. 西藏多不杂铜矿床稀土元素地球化学特征研究 [J]. 中国稀土学报, 2018, 36 (1): 122 ~ 128.
- HE Yangyang, WEN Chunqi, LIU Xianfan. REE Geochemical characteristics of the Duobuza copper deposit, Tibet [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2018, 36 (1): 122 ~ 128. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘显凡, 楚亚婷, 卢秋霞, 等. 云南老王寨金矿的深部地质过程——来自显微岩相学和元素地球化学的证据 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2012, 42 (4): 1026 ~ 1038.
- LIU Xianfan, CHU Yating, LU Qiuxia, et al. Deep geological processes on Laowangzhai gold deposit in Yunnan: evidence from petrography and element geochemistry [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42 (4): 1026 ~ 1038. (in Chinese with English abstract)
- [19] Liu X F, Li C H, Lu Q X, et al. The genesis mechanism of the mantle fluid action and evolution in the ore-forming process: a case study of the Laowangzhai gold deposit in Yunnan, China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2012, 86 (3): 608 ~ 618.
- [20] 李春辉, 刘显凡, 赵甫峰, 等. 金顶超大型铅锌矿床中的地幔流体现实踪迹与壳幔混染叠加成矿机制 [J]. 地学前缘, 2011, 18 (1): 194 ~ 206.
- LI Chunhui, LIU Xianfan, ZHAO Fufeng, et al. Actual traces of mantle fluid of Jinding super-large Pb-Zn deposit and the mechanism of crust-mantle overlapping mineralization [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18 (1): 194 ~ 206. (in Chinese with English abstract)
- [21] 邓碧平, 刘显凡, 朱建军, 等. 壳幔混染成矿机制的稀有气体同位素及硅同位素证据以滇西富碱斑岩型多金属矿区为例 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2014, 44 (6): 1856 ~ 1868.
- DENG Biping, LIU Xianfan, ZHU Jianjun, et al. Noble gas isotope and silicon isotope evidences of crust-mantle mixing ore-formation mechanism: exemplified by the alkali-rich porphyry polymetallic deposits in western Yunnan, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44 (6): 1856 ~ 1868. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王金荣, 陈万峰, 张旗, 等. N-MORB 和 E-MORB 数据挖掘——玄武岩判别图及洋中脊源区地幔性质的讨论 [J]. 岩石学报, 2017, 33 (3): 993 ~ 1005.
- WANG Jinrong, CHEN WanFeng, ZHANG Qi, et al. Preliminary research on data mining of N-MORB and E-MORB: Discussion on method of the basalt discrimination diagrams and

- the character of MORB's mantle source [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33 (3): 993 ~ 1005. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义 [J]. *岩石学报*, 2001, 17 (2): 236 ~ 244.
ZHANG Qi, WANG Yan, QIAN Qing, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17 (2): 236 ~ 244. (in Chinese with English abstract)
- [24] 余宏全, 李进文, 马东方, 等. 西藏多不杂斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb SHRIMP 测年及地质意义 [J]. *矿床地质*, 2009, 28 (6): 737 ~ 746.
SHE Hongquan, LI Jinwen, MA Dongfang, et al. Molybdenite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of Duobuza porphyry copper deposit in Tibet and its geological implications [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28 (6): 737 ~ 746. (in Chinese with English abstract)
- [25] Zhou X, Fei G C, Zhou Y, et al. Chronology and crust-mantle mixing of ore-forming porphyry of the bangongco: evidence from zircon U-Pb age and Hf isotopes of the naruo porphyry copper-gold deposit [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2015, 89 (1): 217 ~ 228.
- [26] Fei G C, Zhou X, Duo J, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of ore-bearing granodiorite porphyry in the Duobuza porphyry copper deposit, Tibet [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2015, 86 (2): 223 ~ 232.
- [27] 符家骏, 赵元艺, 郭硕. 西藏多龙矿集区花岗闪长斑岩地球化学特征及其意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33 (6): 1039 ~ 1051.
FU Jiajun, ZHAO Yuanyi, GUO Shuo. Geochemical characteristics and significance of granodiorite porphyry in the Duolong ore concentration area, Tibet [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2014, 33 (6): 1039 ~ 1051. (in Chinese with English abstract)
- [28] 乔东海, 赵元艺, 汪傲, 等. 西藏多龙矿集区地堡铜 (金) 矿床年代学、流体包裹体、地球化学特征及其成因类型研究 [J]. *地质学报*, 2017, 91 (7): 1542 ~ 1564.
QIAO Donghai, ZHAO Yuanyi, WANG Ao, et al. Geochronology, fluid inclusions, geochemical characteristics of Dibao Cu (Au) Deposit, Duolong ore concentration area, Xizang (Tibet), and its genetic type [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91 (7): 1542 ~ 1564. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王松, 赵元艺, 汪傲, 等. 西藏拿顿铜 (金) 矿床岩矿相学、流体包裹体和地球化学特征与成矿作用研究 [J]. *地质学报*, 2017, 91 (7): 1565 ~ 1588.
WANG Song, ZHAO Yuanyi, WANG Ao, et al. The study of faciology-mineragraphy, fluid inclusions, and geochemical characteristics and mineralization in Nadun Cu (Au) deposit, Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91 (7): 1565 ~ 1588. (in Chinese with English abstract)
- [30] 何阳阳. 西藏班怒西段多不杂铜矿床成因研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
HE Yangyang. Genesis study for the Duobuza copper deposit in the western part of Bangonghu-Nujiang metallogenic belt, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [31] 何阳阳, 温春齐, 刘显凡. 西藏多不杂铜矿床硫铅同位素地球化学示踪 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35 (5): 855 ~ 862.
HE Yangyang, WEN Chunqi, LIU Xianfan. Sulfur and lead isotope geochemical tracing of the Duobuza copper deposit, Tibet [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35 (5): 855 ~ 862. (in Chinese with English abstract)
- [32] 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 等. 透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据 [J]. *地学前缘*, 2007, 14 (3): 165 ~ 183.
LUO Zhaohua, MO Xuanxue, LU Xinxiang, et al. Metallogeny by trans-magmatic fluids—theoretical analysis and field evidence [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (3): 165 ~ 183. (in Chinese with English abstract)
- [33] 罗照华, 卢欣祥, 郭少丰, 等. 透岩浆流体成矿体系 [J]. *岩石学报*, 2008, 24 (12): 2669 ~ 2678.
LUO Zhaohua, LU Xinxiang, GUO Shaofeng, et al. Metallogenic systems on the transmagmatic fluid theory [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (12): 2669 ~ 2678. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘显凡, 蔡永文, 卢秋霞, 等. 滇西地区富碱斑岩中地幔流体作用踪迹及其成矿作用意义 [J]. *地学前缘*, 2010, 17 (1): 114 ~ 136.
LIU Xianfan, CAI Yongwen, LU Qiuxia, et al. Actual traces of mantle fluid from alkali-rich porphyries in western Yunnan, and associated implications to metallogenesis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17 (1): 114 ~ 136. (in Chinese with English abstract)
- [35] 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞. 地幔流体与铀成矿作用 [J]. *地学前缘*, 2004, 11 (2): 491 ~ 499.
JIANG Yaohui, JIANG Shaoyong, LING Hongfei. Mantle-derived fluids and uranium mineralization [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11 (2): 491 ~ 499. (in Chinese with English abstract)
- [36] 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 等. 西藏班公湖-怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和元素地球化学的证据 [J]. *岩石学报*, 2011, 27 (7): 1993 ~ 2002.
DU Dedao, QU Xiaoming, WANG Genhou, et al. Bidirectional subduction of the Middle Tethys oceanic basin in the west segment of Bangonghu-Nujiang suture, Tibet: Evidence from zircon U-Pb LAICPMS dating and petrogeochemistry of arc granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (7): 1993 ~ 2002. (in Chinese with English abstract)