

于玉帅, 杨竹森, 戴平云, 等. 西藏措勤尼雄矿田日阿铜多金属矿床岩浆活动时代及成因[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 118-133.
Yu Yushuai, Yang Zhusen, Dai Pingyun, et al. Geochronology and genesis of the magmatism in the Ri'a copper polymetallic deposit of the Nixiong orefield, Coqen, Tibet [J]. Geology in China, 2015, 42(1): 118-133(in Chinese with English abstract).

西藏措勤尼雄矿田日阿铜多金属矿床 岩浆活动时代及成因

于玉帅^{1,2,3} 杨竹森⁴ 戴平云^{1,2} 田世洪⁴ 高原⁵ 刘英超⁶ 修迪⁷

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205; 3. 东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室, 江西 南昌 330013; 4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 5. 江西省地质调查院, 江西 南昌 330201; 6. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 7. 河北省区域地质矿产调查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 位于冈底斯中北部地区的日阿铜多金属矿床是尼雄矿田铜成矿作用的典型代表, 是措勤—申扎铁铜多金属成矿带的重要组成部分。本文对矿床成矿岩体黑云母花岗岩进行了矿物电子探针、主量元素、微量元素分析并用 LA-ICP-MS 技术对其中的锆石进行了 U-Th-Pb 同位素测定。结果表明, 黑云母花岗岩属钾玄岩系列, 为典型的 I 型花岗岩, 源区为壳幔混合来源, 获得锆石 U-Pb 年龄为 (89.9±1.6) Ma, 与矿区基性侵入岩年龄一致。结合前人研究成果, 认为矿区晚白垩世早期的双峰岩浆活动与成矿作用关系密切。综合矿区所处大地构造环境, 认为矿区岩浆活动受北侧的班公湖—怒江洋壳和南侧雅鲁藏布江洋壳俯冲的双重控制。

关键词: 锆石 U-Pb; LA-ICP-MS; 时代与成因; 岩浆活动; 日阿铜矿; 尼雄矿田; 西藏

中图分类号: P588.12¹; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)01-0118-16

Geochronology and genesis of the magmatism in the Ri'a copper polymetallic deposit of the Nixiong orefield, Coqen, Tibet

YU Yu-shuai^{1,2,3}, YANG Zhu-sen⁴, DAI Ping-yun^{1,2},
TIAN Shi-hong⁴, GAO Yuan⁵, LIU Ying-chao⁶, XIU Di⁷

(1. Wuhan Center of Geological Survey, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (ECIT), Ministry of Education, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 4. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 5. Jiangxi Institute of Geological Survey, Nanchang 330201, Jiangxi, China; 6. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 7. Hebei Institute of Regional Geology and Mineral Resources Survey, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: The Ri'a copper-polymetallic deposit, as a typical representative copper metallogenesis of the Nixiong orefield and an

收稿日期: 2014-01-13; 改回日期: 2014-05-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2011CB403100 和 2009CB421007)、中国地质调查局地质调查项目 (1212010918014 和 12120114047001)、东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室开放基金项目 (NRE1206) 联合资助。

作者简介: 于玉帅, 男, 1985 生, 助理研究员, 从事矿床学研究; E-mail: shuaiyuyu1103@163.com。

important part of Cuoqin–Shenzha iron–copper metallogenetic belt, is located in the middle north of Gangdise. The authors analyzed the mineral composition, major elements, trace elements, and U–Th–Pb composition of zircon from biotite granite associated with copper mineralization in the Ri’ a copper polymetallic deposit by LA–ICP–MS. The results show that the biotite granite has typical characteristics of I–type granite, belongs to shoshonite series and must have originated from a crustal–mantle provenance. Zircon U–Th–Pb dating yielded $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of $(89.9\pm 1.6)\text{Ma}$, which is consistent with the age of mafic intrusive in the Ri’ a copper–polymetallic deposit. Combined with the results of previous studies, the authors hold that the bimodal magmatism of Early Late Cretaceous was closely related to mineralization of the Ri’ a copper–polymetallic deposit. In consideration of the tectonic environment, the authors propose that the magmatism was controlled by the subduction of both Bangong Co–Nujiang ocean crust and Brahmaputra ocean crust.

Key words: zircon U–Pb; LA–ICP–MS; geochronology and genesis; magmatism; Ri’ a copper deposit; Nixiong Orefield; Tibet

About the first author: YU Yu–shuai, male, born in 1985, assistant researcher, engages in the study of mineral deposits; E–mail: shuaiyuyu1103@163.com.

西藏尼雄矿田位于措勤县城东南约 100 km, NW–SE 依次展布有滚纠、尼雄、沙松南、毛加崮磁铁矿床和日阿铜多金属矿床。自国土资源大调查发现以来,引起了地质工作者的广泛关注,成为冈底斯中北部中生代大型–超大型铁(铜)矿床的典型代表^[1–11]。于玉帅等精细厘定了滚纠铁矿成岩–成矿作用时代,并提出岩浆活动(113 Ma)和铁成矿作用(112.6 Ma)与俯冲的班公湖–怒江洋壳密切相关^[8–9];通过对碳–氢–氧–硫同位素和矿物学分析,指出成矿流体主要来源于花岗质岩浆,并初步总结了滚纠铁矿矽卡岩成矿作用机制^[11]。日阿铜多金属矿床作为尼雄矿田铜成矿作用的典型代表,对铜成矿作用相关岩浆活动时代及成因进行精细刻画,不仅为区域岩浆事件的深入研究提供资料积累,还能在一定程度上指导区域找矿。虽然前人已经报道了矿区存在晚白垩世双峰岩浆活动^[2,4–5],但对其形成机制及大地构造背景涉猎较少。笔者根据最新的矿区地质勘查资料和区域研究进展,通过矿区野外地质调查、成矿岩体黑云母花岗岩详细的岩矿鉴定、矿物电子探针分析、全岩地球化学以及 LA–ICP–MS 锆石 U–Th–Pb 同位素分析,结合前人分析数据,揭示日阿铜矿成矿作用相关岩浆活动时代,并详细探讨大地构造背景及岩浆活动成因机制。

1 矿床地质概况

尼雄矿田大地构造位置处于巨型冈底斯构造–岩浆岩带隆格尔–工布江达弧背断隆带,是措勤–申扎铁铜多金属成矿带的重要组成部分。冈底斯构造–岩浆岩带北以班公湖–怒江碰撞结合带为界

与南羌塘相接,南以雅鲁藏布江碰撞结合带与印度板块北缘毗邻,受古特提斯、特提斯洋的演化作用控制,形成了区内北西西向展布的弧背断隆带和以白垩纪大规模中酸性岩浆侵位和新生代大规模的火山喷发为主体的岩浆活动。区内古生代早石炭世永珠组(C_{1y})、晚石炭–早二叠世拉嘎组($C_2–P_1l$)和二叠纪昂杰组(P_1a)、下拉组(P_2x)和敌布错组(P_3d)等碳酸盐地层发育。

日阿铜矿床位于尼雄矿田东南,行政隶属昂仁县孔隆乡,矿区范围为北纬 $30^{\circ}33'46''\sim 30^{\circ}37'42''$ 、东经 $85^{\circ}46'50''\sim 85^{\circ}51'50''$,面积约 30 km^2 。矿区主要出露二叠纪海相地层,包括下统昂杰组(P_1a)、中统下拉组(P_2x)、上统敌布错组(P_3d),以及古近纪日贡拉组陆相火山岩(E_3r)和第四系(Q)。矿区岩浆活动强烈,为尼雄岩体的东延部分,出露有 2 处,其中西部的岩体出露面积较大,超过 10 km^2 ,为燕山晚期花岗闪长岩和二长花岗岩;东部的岩体面积出露较小,仅约 1 km^2 ,为黑云母花岗岩,另有少量的中酸性、中基性岩脉。其中,黑云母花岗闪长岩和黑云母花岗岩与铜矿成矿关系密切。在已发现矿体中,铜矿体长一般为 $300\sim 650\text{ m}$,厚度在 $1.27\sim 18.33\text{ m}$ 。矿区西部铜矿体与黑云母花岗闪长岩密切相关,矿区东部铜矿体主要产于黑云母花岗岩与下拉组灰岩接触带的矽卡岩或矽卡岩化大理岩中,产状和规模严格受岩体侵入接触面控制。

黑云母花岗岩手标本可见较大的钾长石斑晶,粒径大小不一,大者可达 $5\sim 10\text{ cm}$ 或更大(图 2–a)。靠近灰岩接触带附近岩石蚀变发育,主要有钠长石化、绿泥石化、粘土化、绿帘石化和黄铁矿化等

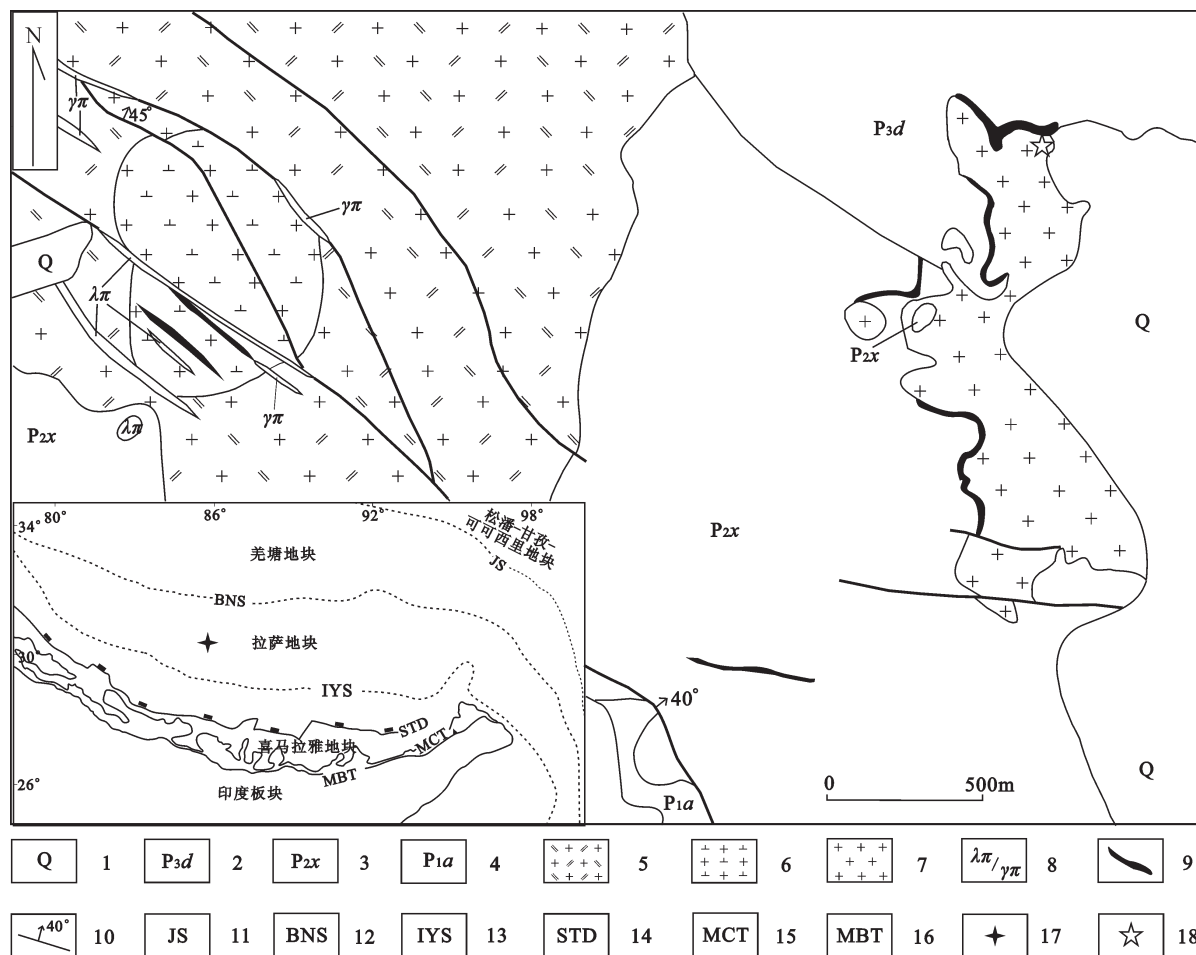


图1 日阿矿 区地质简图

1—第四系;2—敌布错组;3—下拉组;4—昂杰组;5—二长花岗岩;6—花岗岩闪长岩;7—黑云母花岗岩;8—酸性岩脉;9—铜矿体;
10—断层及产状;11—金沙江缝合带;12—班公湖—怒江缝合带;13—印度河—雅鲁藏布江缝合带;14—藏南拆离系;15—主中央逆冲断裂;
16—主边界逆冲断裂;17—矿床位置;18—采样位置

Fig.1 Geological sketch map of the Ri'a Cu deposit

1—Quaternary; 2—Dibucuo Formation; 3—Xiala Formation; 4—Angjie Formation; 5—Monzonitic granite; 6—Granodiorite; 7—Biotite granite; 8—Acid vein; 9—Copper orebody; 10—Fault and attitude; 11—Jinsha River suture; 12—Bangong Co—Nujiang River suture; 13—Indus River—Yarlung Zngbo River suture; 14—South Tibet detachment system; 15—Main central thrust; 16—Main boundary thrust; 17—Deposit location; 18—Sampling position

(图2-b)。岩石具有似斑状结构,主要由斜长石、钾长石、石英和暗色矿物黑云母等组成(图2-c、d),偶见角闪石,副矿物为锆石、榍石、磷灰石及磁铁矿。其中,斜长石呈柱状或板状,粒径0.1~3 mm,局部发生粘土化而呈现表面脏浊,含量约35%;钾长石呈不规则柱状或板状,粒径变化范围较大,多数为0.1~1 mm,可见达数厘米的斑晶,表面发生高岭土化,含量约占30%;石英呈他形粒状结构,粒径较小,为0.1~0.3 mm,偶见有波状消光,含量约20%;暗色矿物黑云母呈板状、叶片状,偏光镜下多色性明显,发育一组完全解理,含量约5%,副矿物含量少于1%。

2 样品采集与分析方法

在矿区进行详细的地质调查并采集了与成矿密切相关黑云母花岗岩,取样位置为北纬30°35'25.2"、东经85°50'55.8",海拔5080 m。选取新鲜原岩样品,在河北省廊坊市区域地质调查队实验室进行电子探针片磨制、锆石单矿物分选以及地球化学样品的碎样。

矿物电子探针分析在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室进行,分析仪器型号是电子探针JXA-8100、能谱仪Inca Energy,加速电压15.0 kV,电

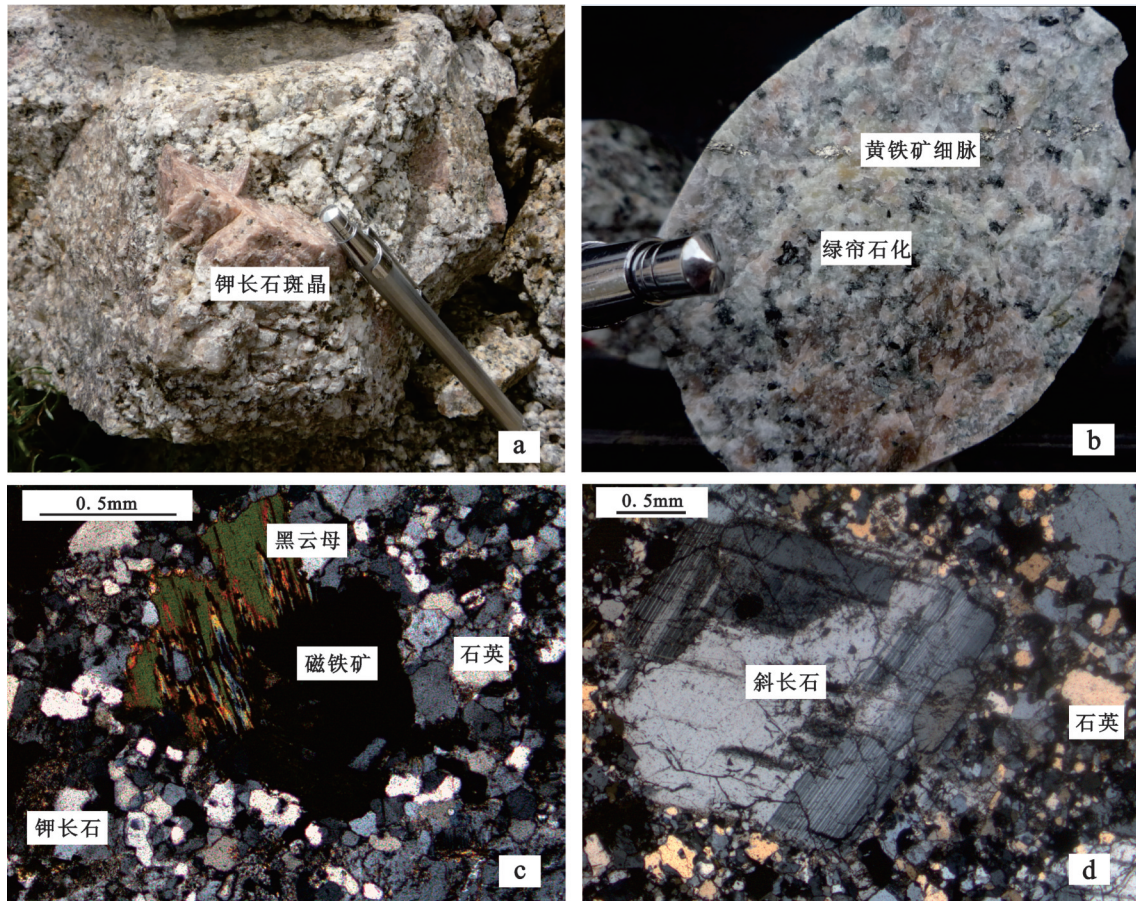


图2 黑云母花岗岩手标本(a, b)和显微照片(c, d正交偏光)

a—黑云母花岗岩中的钾长石斑晶; b—含黄铁矿细脉、弱绿帘石化黑云母花岗岩; c, d—黑云母花岗岩主要矿物组成及似斑状结构

Fig.2 Hand specimen photograph (a, b) and microphotograph (c, d, crossed nicols) of the biotite granite

a—Potassium feldspar phenocryst in the biotite granite; b—Pyrite veinlet in weakly epidotized biotite granite; c, d— Major mineral and porphyroid texture of biotite granite

子束斑 $2\ \mu\text{m}$, 探针束流 $20\ \text{nA}$ 。岩石地球化学主量元素、微量元素及稀土元素分析, 分析测试工作在中国核工业地质分析研究中心完成。常量元素分析采用 PHILIPS PW-2404 X-荧光光谱仪, 微量元素和稀土元素的分析采用 ELEMENT-2 型等离子质谱仪。锆石阴极发光显微照相、LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素和稀土元素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行, 前者在扫描电镜加载阴极发光仪上完成, 后者在 Agilent 7500a 型 ICP-MS 完成, 实验流程参见 Yuan et al^[12]。锆石 U-Th-Pb 同位素测定中普通铅扣除采用 Andersen 方法^[13], 用 Isoplot 软件绘制 U-Pb 谐和图和进行有关计算, 单个数据的误差为 1σ 。

3 分析结果

3.1 黑云母成分

黑云母花岗岩中黑云母含 SiO_2 35.34%~35.42%, 平均 35.39%; TiO_2 3.86%~4.19%, 平均 4.05%; Al_2O_3 为 13.31%~13.61%, 平均 13.44%; FeO 为 17.31%~17.84%, 平均 17.54%; MgO 为 12.68%~13.03%, 平均 12.90%; K_2O 为 10.90%~11.21%, 平均 11.09% (表 1), 为典型的镁质黑云母^[14]。计算得到 $0.22 < \text{Ti} < 0.24$ 、 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 均值为 0.57, $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 值均一 (约为 0.43), 属典型的岩浆成因黑云母^[15], 这与黑云母成因判别图解投影结果吻合^[16], 且未受后期热事件改造^[17]。

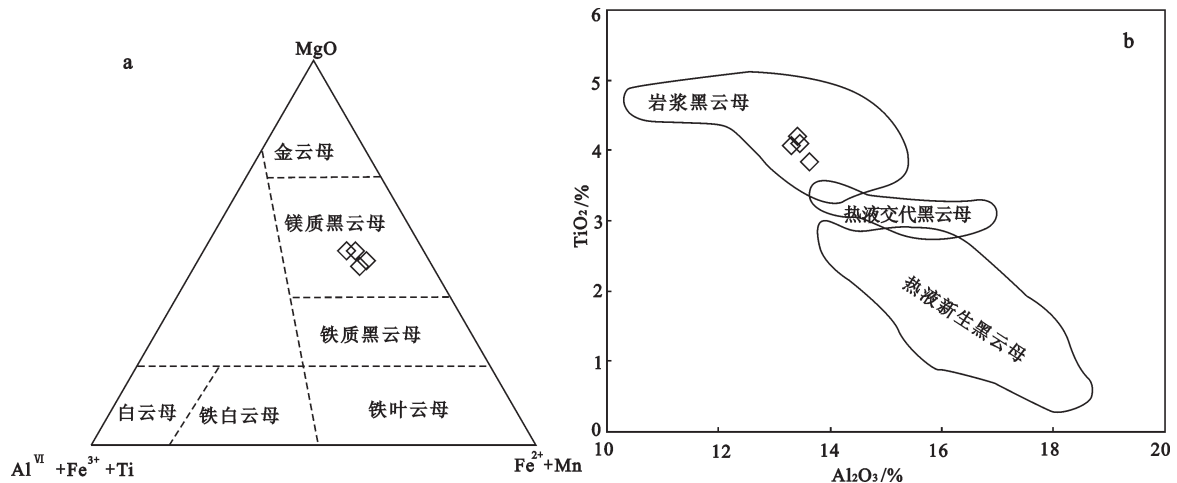


图3 黑云母花岗岩云母分类图解(a据[14];b据[16])

Fig.3 Classification of mica from biotite granite (a after[14]; b after[16])

表1 黑云母电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses of mica from biotite granite(%)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	F	Total
CQ09-8-1.1	35.37	4.19	13.44	17.84	0.76	13.03	0.00	0.40	11.21	0.78	97.01
CQ09-8-5.1	35.42	4.10	13.41	17.58	0.72	12.95	0.02	0.21	11.11	0.57	96.09
CQ09-8-3.1	35.42	3.86	13.61	17.44	0.74	12.68	0.02	0.29	10.90	0.44	95.39
CQ09-8-2.1	35.34	4.06	13.31	17.31	0.66	12.95	-	0.17	11.15	0.80	95.75
以11个O原子计算阳离子数											
样品号	Si	Ti	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Na	K	Total
CQ09-8-1.1	2.7149	0.2418	1.2158	0.0000	0.0000	1.1450	0.0491	1.4904	0.0588	1.0977	8.0135
CQ09-8-5.1	2.7313	0.2378	1.2191	0.0000	0.0167	1.1173	0.0470	1.4887	0.0314	1.0926	7.9819
CQ09-8-3.1	2.7427	0.2246	1.2420	0.0000	0.0279	1.1013	0.0485	1.4631	0.0438	1.0769	7.9709
CQ09-8-2.1	2.7389	0.2368	1.2159	0.0000	0.0199	1.1021	0.0431	1.4960	0.0254	1.1020	7.9801

注：“-”表示低于检测限。

3.2 岩石地球化学

黑云母花岗岩主量元素分析结果(表2)显示:岩石明显高硅, SiO₂ 含量 72.91%~76.25%, 平均 74.83%; Al₂O₃ 含量中等, 变化于 12.04%~13.11%, 平均 12.64%; 富碱, K₂O 为 4.87%~7.82%, 平均 5.87%; Na₂O 在 2.09%~3.53%, 平均 2.83%, 全碱(K₂O+Na₂O) 均值 8.71%, 且绝大部分 K₂O 大于 Na₂O, K₂O/Na₂O 介于 1.38~3.74, 均大于 1; MgO 含量明显偏低, 平均仅为 0.35%。铝饱和指数(A/CNK) 为 0.88~1.05, 小于 1.1, 属准铝质-弱过铝质花岗岩范畴, 与 I 型花岗岩相似^[18-19]。在 TAS 图解上样品落入花岗岩区域(图 4-a), SiO₂-K₂O 图解显示为钾玄岩

系列(图 4-b)。CIPW 标准矿物计算主要矿物为石英、钙长石、钠长石、正长石, 次要矿物透辉石、磁铁矿、钛铁矿和磷灰石, 仅有 2 个样品计算有刚玉(分子数分别为 0.78 和 0.42, 均小于 1), 与 I 型花岗岩标准矿物中可含少量刚玉特征相吻合^[19-20]。样品贫磷, P₂O₅ 含量 0.05%~0.08%, 远小于 0.2%, 且 SiO₂ 与 P₂O₅ 的负相关, 明显区别典型的 S 型花岗岩, 而与 I 型花岗岩相似。SiO₂ 与 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、CaO、P₂O₅、TiO₂ 呈良好的负相关(图 5), 指示岩浆经历分离结晶或不同源区岩浆的混合。

黑云母花岗岩稀土元素主要有以下特征:(1) 稀土元素总量较地壳岩浆岩平均值 164×10^{-6} 低,

表2 黑云母花岗岩主量元素(%), 稀土元素和微量元素(10^{-6})组成
 Table 2 Major elements (%), REE and trace elements (10^{-6}) composition of biotite granite

样号	CQRA09-2	CQRA09-4	CQRA09-6	CQRA09-7	CQRA09-8	CQRA09-9
SiO ₂	73.78	75.03	72.91	76.25	76.15	74.87
TiO ₂	0.23	0.22	0.19	0.20	0.18	0.20
Al ₂ O ₃	12.74	13.11	12.98	12.30	12.04	12.69
Fe ₂ O ₃	0.61	1.25	0.43	0.75	1.43	0.76
MnO	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03
MgO	0.58	0.44	0.53	0.36	0.45	0.54
CaO	2.20	0.78	1.48	0.38	0.97	1.90
Na ₂ O	3.11	3.53	2.09	2.66	2.74	2.87
K ₂ O	4.96	4.87	7.82	6.43	5.56	5.59
P ₂ O ₅	0.08	0.07	0.05	0.06	0.06	0.07
FeO	0.15	0.25	0.10	0.10	0.40	0.20
H ₂ O ⁺	1.07	0.46	1.35	0.49	0.22	0.35
LOI	1.63	0.66	1.47	0.61	0.38	0.44
Total	101.17	100.69	101.43	100.60	100.60	100.52
Rb	191	245	301	247	219	245
Ba	708	457	703	356	468	375
Th	21.00	21.30	23.70	29.50	28.10	29.80
U	2.48	1.63	1.89	1.65	2.56	3.41
Ta	1.78	1.97	2.10	2.50	2.54	2.40
Nb	13.30	15.80	15.70	18.30	18.30	17.50
Pb	11.80	18.20	11.40	14.50	19.90	14.00
Sr	625	214	970	336	255	1873
Zr	95.30	86.50	62.00	74.90	107.00	93.20
Hf	2.95	3.05	2.30	2.89	3.23	3.56
W	2.74	3.94	1.45	3.09	0.60	2.86
La	24.00	34.40	24.00	21.00	33.90	28.50
Ce	50.60	60.80	45.00	41.50	64.90	57.40
Pr	5.47	6.18	5.12	4.41	6.58	6.22
Nd	19.80	21.50	18.80	16.70	24.00	23.00
Sm	3.79	3.70	3.66	3.46	4.59	4.18
Eu	0.84	0.65	0.63	0.51	0.74	0.81
Gd	2.94	2.73	2.75	2.64	3.50	3.46
Tb	0.49	0.44	0.46	0.46	0.62	0.60
Dy	2.71	2.42	2.74	2.40	3.26	3.35
Ho	0.45	0.41	0.50	0.44	0.63	0.62
Er	1.40	1.26	1.52	1.46	1.98	1.97
Tm	0.24	0.21	0.25	0.23	0.33	0.32
Yb	1.54	1.41	1.67	1.58	2.33	2.10
Lu	0.25	0.21	0.27	0.24	0.34	0.33
Y	12.60	13.30	15.80	14.10	20.40	19.80
∑REE	127.12	149.61	123.17	111.13	168.11	152.65
(La/Yb) _N	10.36	17.71	9.48	9.49	10.55	9.14
δ Eu	0.74	0.60	0.58	0.49	0.54	0.63

注: $\delta\text{Eu} = 2 (\text{Eu})_{\text{N}} / (\text{Sm} + \text{Gd})_{\text{N}}$

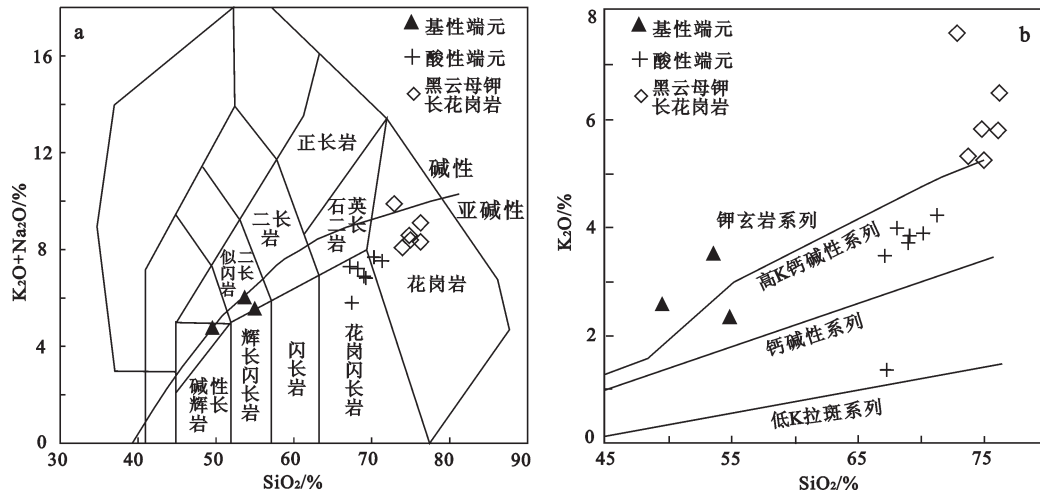


图4 黑云母花岗岩 TAS(a)和 SiO₂-K₂O(b)关系图(酸性端元和基性端元引自[2])
Fig.4 TAS(a) and K₂O-SiO₂(b) diagram of biotite granite (acid end-members and basic end-member after [2])

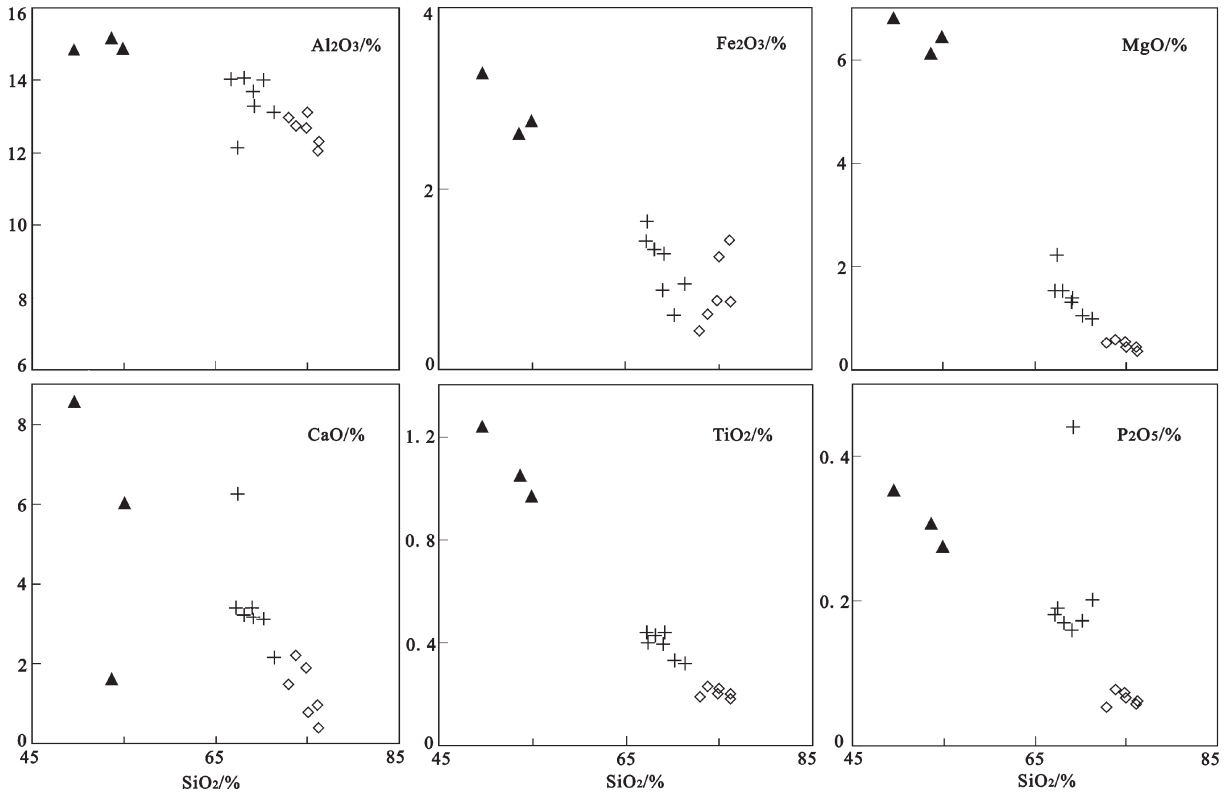


图5 黑云母花岗岩 Harker 图解(图例同4)
Fig.5 Harker diagrams of biotite granite (legends as for Fig. 4)

Σ REE 变化于 $111 \times 10^{-6} \sim 168 \times 10^{-6}$, 平均 139×10^{-6} ; (2) 稀土元素配分模式图右倾(图 6-a), 轻重稀土分馏明显, LREE 相对富集, HREE 相对亏损, $(La/Yb)_N$ 为 9.14~17.71, 平均 11.12; (3) 存在明显的负 Eu 异常,

δEu 为 0.49~0.74, 平均 0.60, 指示岩浆演化过程中有斜长石结晶分异或源区有斜长石残留; (4) Sm/Nd 比值介于 0.17~0.21, 指示地壳物质是组成岩浆源区的重要部分; (5) $(Ga/Al) \times 10^4$ 介于 1.91~2.31, 均值

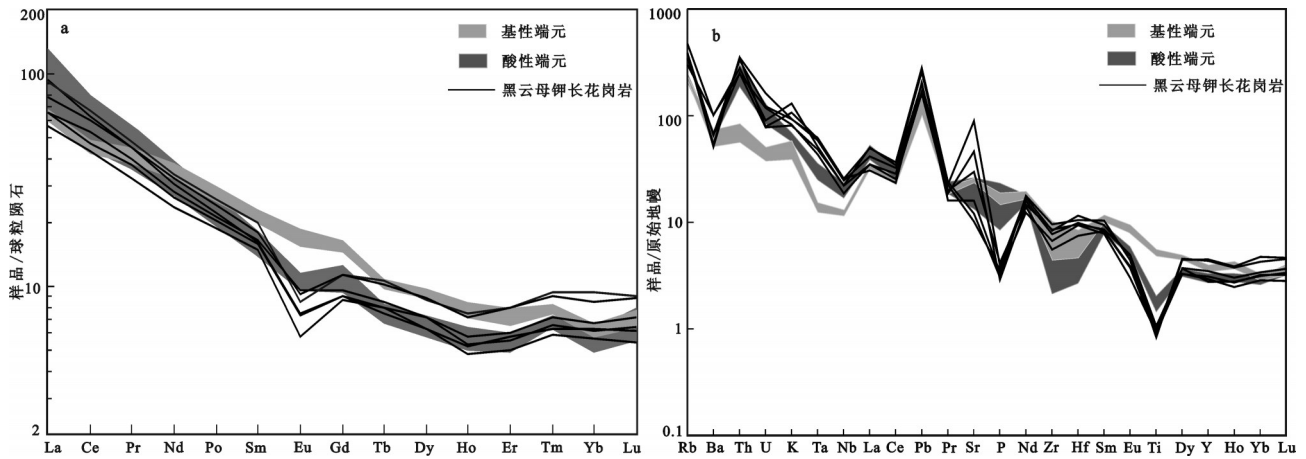


图6 黑云母花岗岩稀土元素配分图(a)和微量元素蜘蛛网图(b)
(球粒陨石标准化值采用 Taylor and McLennan,1985^[23] 值)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spectrum (b) of biotite granite (chondrite-normalized values after Taylor and McLennan (1985)^[23])

2.08, 明显区别于S型($(Ga/Al) \times 10^4 = 2.28$)和A型($(Ga/Al) \times 10^4 > 2.60$)花岗岩, 与典型的I型花岗岩($(Ga/Al) \times 10^4 = 2.10$)相似^[21]。微量元素元素蛛网图上(图6-b), 黑云母花岗岩Rb、K、Th、Sr、Pb、Nd等大离子亲石元素富集, Nb、P、Ti等高场强元素亏损, 反映岛弧岩浆作用亲缘性^[22], P、Ti、Nb负异常与磷灰石、Fe-Ti氧化物残留或分异有关。

3.3 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和稀土元素

黑云母花岗岩锆石的CL图像(图7-a)显示, 锆石晶体呈长柱状或短柱状, 长80~350 μm , 宽20~120 μm 。锆石晶体自形程度较高, 内部结构清晰; 锆石多具有核幔构造, 核部发育有清晰的震荡环带、带状和针状构造; 边部则多为密集的震荡环带, 多数锆石具有黑色的增生边。所测锆石Th含量

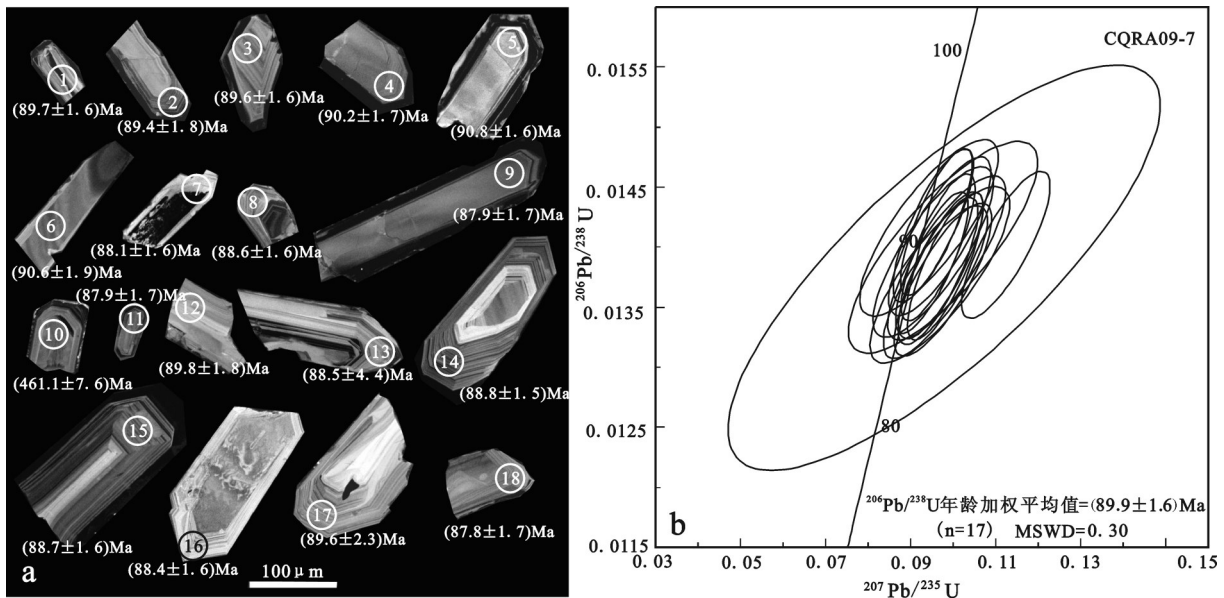


图7 黑云母花岗岩(CQRA09-7)锆石 CL 图像及²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄(a)和U-Pb 谐和图(b)

Fig.7 Cathodoluminescence image, ²⁰⁶Pb/²³⁸U age (a) and U-Pb concordia diagram (b) of zircon grains from biotite granite (CQRA09-7)

$79 \times 10^{-6} \sim 1150 \times 10^{-6}$, U 含量 $165 \times 10^{-6} \sim 1018 \times 10^{-6}$, 呈较好的正相关性, Th/U 为 0.43~2.03, 均大于 0.1 (表 3)。以上特征均指示黑云母花岗岩锆石为岩浆成因^[24]。

用 LA-ICP-MS 技术共测得黑云母花岗岩中 18 颗锆石 U-Th-Pb 同位素数值, 其中 17 个数据在 U-Pb 谐和图中的投影点位于谐和线或其附近, 呈现较好的谐和性 (图 7-b), 表明锆石形成后的 U-Pb 体系基本封闭, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(87.8 \pm 1.7) \sim (90.8 \pm 1.6)$ Ma, 加权平均值为 (89.9 ± 1.6) Ma (MSWD=0.30), 被解释为锆石的结晶年龄; 另有 1 个数据为 (461.1 ± 7.6) Ma, 此年龄与藏南泛非期花岗岩的年龄相当, 应为岩浆源区泛非期花岗岩的锆石残留^[25]。

锆石稀土元素原位分析结果 (表 4) 显示第 I 期锆石稀土元素总量中等 ($\sum \text{REE} = 652 \times 10^{-6}$); 第 II 期锆石稀土元素总量中等-高 ($\sum \text{REE} = 707 \times 10^{-6} \sim 2800 \times 10^{-6}$)。两期锆石稀土元素配分模式图 (图 8) 具典型岩浆成因锆石特征: 左倾, 轻稀土亏损, 重稀土富集, $(\text{Yb}/\text{Nd})_{\text{CN}}$ 分别为 943 和 93~3712。两者均存在显著的 Eu 负异常和 Ce 正异常, $\delta\text{Eu} = 0.07$ 和 $0.19 \sim 0.41$ (平均 0.29), $\delta\text{Ce} = 19.80$ 和 $2.65 \sim 265.52$ (平均 74.55)。Eu 负异常通常与岩浆演化过程中斜长石结晶分异有关, 还可能指示源区有斜长石残留; Ce 正异常则可能是岩浆源区高氧逸度所致。

4 讨 论

4.1 成岩时代

日阿铜多金属矿床东矿区铜矿体主要产于黑云母钾长石花岗岩与下拉组灰岩接触带, 辛洪波等测得矿区与铜矿体伴生的金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄为 (87.1 ± 1.3) Ma^[4], 从而得出成矿作用发生于晚白垩世早期的结论。曲晓明等发现矿区存在双峰式岩浆活动, 测得基性岩脉和酸性侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (87.2 ± 1.6) Ma 和 (90.1 ± 1.5) Ma^[2]。本文对矿区成矿岩体黑云母钾长石花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (89.9 ± 1.6) Ma (MSWD=0.30), 与成矿时代和双峰侵入岩时代一致。王保弟等在措勤北侧拔拉扎铜矿获得成矿斑岩锆石 U-Pb 年龄为 88.0~93.8 Ma, 辉钼矿 Re-Os 模式年龄 88.2~89.6 Ma^[26]; 嘎拉勒铜金多金属矿床成矿花岗岩闪长岩和闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄 86.5 Ma 和 89.1 Ma^[27]; 尕尔穷铜金多金

属矿床成矿石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄 (87.1 ± 0.4) Ma, 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄 (86.8 ± 0.5) Ma^[28]。结合本次分析获得数据表明冈底斯中北部晚白垩世早期岩浆侵入活动多与区域大规模的 Cu(-Au-Mo) 多金属成矿作用具有密切联系。同时也表明, 冈底斯中北部措勤-申扎岩浆弧带寻找与晚白垩世岩浆侵入活动有关的斑岩-矽卡岩 Cu(-Au-Mo) 可能会有较大突破。

4.2 源区性质及演化

日阿黑云母花岗岩中黑云母 MgO 变化在 13.31%~13.61%, 介于幔源成因黑云母 ($\text{MgO} > 15\%$) 和壳源成因黑云母 ($\text{MgO} < 6\%$) 之间^[29], 指示岩浆壳幔来源。在 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} - \delta\text{Eu}$ 图解上 (图 9-a) 黑云母花岗岩落在壳源和幔源分界线附近, 主体为地壳物质, 而辉绿玢岩则都落在壳幔源区域内。黑云母花岗岩锆石 $\sum \text{REE}$ 为 $707 \times 10^{-6} \sim 2800 \times 10^{-6}$, 明显大于幔源岩浆锆石 ($< 300 \times 10^{-6}$), 显著 Ce 正异常 (平均 74.55) 以及全岩 Sm/Nd 比值 (0.17~0.21) 都反映了壳源物质在源区岩浆的巨大贡献。研究表明^[5], 酸性端元和基性端元具高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值 (基性端元 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 = 0.710594 > 酸性端元 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 = 0.710264); 低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (基性端元 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 平均值 = 0.512338 > 酸性端元 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 平均值 = 0.512217), 负 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (基性端元 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 平均值 = -5.0 > 酸性端元 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 平均值 = -7.2), 同样表明壳源物质在岩浆形成过程成中的重要。

下地壳部分熔融的岩浆产物 $\text{Mg}^\#$ 小于 40^[30], 矿区酸性端元 $\text{Mg}^\#$ 变化较大, 介于 19~48 之间, 平均 31 (< 40), 而基性端元 $\text{Mg}^\#$ 为 44~46, 平均 45 (> 40), 反映矿区酸性和基性端元岩浆起源不同, 且前者为下地壳部分熔融形成, 而后者则可能与下地壳无关。同样的, 基性端元和酸性端元之间 Th 和 U 之间的差异, 为两种岩浆不同起源提供了放射性元素证据^[2]。而 Sr-Nd 同位素研究结果证实了日阿双峰侵入岩酸性和基性端元岩浆来源不同^[5], 即酸性端元起源于下地壳, 基性端元与中地壳关系密切。

Harker 图解所显示的 SiO_2 与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 、 TiO_2 呈良好的负相关 (图 5), 表明分离结晶作用或岩浆混合在岩浆演化过程中也发挥了重要作用。若矿区侵入岩 SiO_2 与 CaO 较好的负相关是由于斜长石分离结晶所致, 那么微量元素

表3 黑云母花岗岩(CQRA09-7)锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素组成
Table 3 U-Th-Pb composition of zircon from biotite granite (CQRA09-7) measured by LA-ICP-MS

测点编号	期次	元素含量 /10 ⁻⁶			元素比值			同位素比值			表面年龄 / Ma				
		²⁰⁶ Pb	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
10	I	58.9	79.2	186	0.43	0.05660	0.00217	0.57891	0.01632	0.07416	0.00127	463.8	10.5	461.1	7.6
1	II	45.4	800	707	1.13	0.05813	0.00268	0.11238	0.00425	0.01402	0.00025	108.1	3.9	89.7	1.6
2	II	43.4	480	639	0.75	0.04950	0.00330	0.09530	0.00575	0.01396	0.00029	92.4	5.3	89.4	1.8
3	II	28.1	245	469	0.52	0.04996	0.00225	0.09643	0.00355	0.01400	0.00025	93.5	3.3	89.6	1.6
4	II	26.5	249	430	0.58	0.04987	0.00286	0.09688	0.00490	0.01409	0.00027	93.9	4.5	90.2	1.7
5	II	36.2	403	608	0.66	0.04873	0.00235	0.09529	0.00385	0.01418	0.00026	92.4	3.6	90.8	1.6
6	II	9.9	329	165	2.00	0.04830	0.00367	0.09430	0.00664	0.01416	0.00030	91.5	6.2	90.6	1.9
7	II	34.8	1150	567	2.03	0.05102	0.00383	0.09687	0.00670	0.01377	0.00030	93.9	6.2	88.1	1.9
8	II	32.6	499	530	0.94	0.04904	0.00218	0.09608	0.00344	0.01421	0.00025	93.2	3.2	90.9	1.6
9	II	63.0	458	1018	0.45	0.05145	0.00234	0.09820	0.00363	0.01384	0.00025	95.1	3.4	88.6	1.6
11	II	38.4	390	616	0.63	0.05156	0.00285	0.09761	0.00469	0.01373	0.00026	94.6	4.3	87.9	1.7
12	II	16.7	124	278	0.45	0.05132	0.00328	0.09845	0.00565	0.01391	0.00028	95.3	5.2	89.0	1.8
13	II	34.1	434	523	0.83	0.05132	0.01121	0.09787	0.02076	0.01383	0.00069	94.8	19.2	88.5	4.4
14	II	33.2	354	558	0.63	0.04964	0.00226	0.09499	0.00349	0.01387	0.00024	92.1	3.2	88.8	1.5
15	II	25.7	242	433	0.56	0.05085	0.00253	0.09710	0.00404	0.01385	0.00025	94.1	3.7	88.7	1.6
16	II	30.2	326	514	0.63	0.05067	0.00243	0.09645	0.00383	0.01380	0.00025	93.5	3.5	88.4	1.6
17	II	29.7	350	522	0.67	0.05056	0.00498	0.09761	0.00907	0.01400	0.00036	94.6	8.4	89.6	2.3
18	II	35.4	279	626	0.45	0.05068	0.00300	0.09580	0.00499	0.01371	0.00026	92.9	4.6	87.8	1.7

表 4 黑云母花岗岩(CQRA09-7)锆石稀土元素(10^{-6})组成
Table 4 In-situ zircon REE composition (10^{-6}) of biotite granite (CQRA09-7)

测点编号	期次	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Yb	Lu	Σ REE	δ Eu	δ Ce	(Yb/Nd) _N			
10	I	0.01	3.09	0.04	0.88	2.34	0.18	14.8	6.02	77.4	30.3	143	30.2	290	52.48	651.48	0.07	19.80	942.71
1	II	0.25	61.8	0.36	4.6	8.25	2.98	40.5	14.7	174	63.1	288	64.5	610	113	1446.18	0.41	38.64	380.06
2	II	0.03	34.4	0.05	0.85	2.43	0.74	15.6	6.32	82.7	33.0	167	38.0	395	75.9	2097.65	0.28	149.30	1338.00
3	II	0.34	26.7	0.13	0.81	2.24	0.54	14.5	6.46	86.3	34.6	176	40.3	412	76.3	876.91	0.22	29.34	1464.20
4	II	0.11	23.3	0.05	0.66	1.59	0.55	13.0	5.50	71.9	28.5	143	31.8	325	61.6	706.8	0.26	75.94	1422.13
5	II	0.09	38.4	0.07	0.97	2.55	0.93	18.9	7.86	107	43.1	221	50.5	524	100	1583.7	0.29	111.28	1549.51
6	II	0.06	30.3	0.51	8.37	12.9	5.83	53.5	16.5	183	64.2	284	61.1	580	111	1410.65	0.58	16.31	198.79
7	II	0.36	67.2	0.25	3.32	6.72	2.46	38.7	14.3	175	64.8	291	60.1	564	101	1389.59	0.36	50.94	486.92
8	II	0.45	53.7	0.24	2.18	4.65	1.75	29.3	11.4	144	53.8	256	54.9	538	98.81	2800.25	0.35	38.10	707.04
9	II	0.4	33.1	0.21	1.94	3.14	0.69	21.6	9.86	133	52.0	258	56.7	563	102	1235.03	0.19	26.19	832.55
11	II	0.66	31.6	0.14	1.23	3.24	0.88	20.9	8.64	114	44.3	222	49.8	511	95.7	1103.6	0.25	23.27	1191.13
12	II	0.01	13.5	0.02	0.23	1.32	0.47	10.7	4.82	65.3	25.7	130	29.0	296	56.0	2338.64	0.27	179.28	3711.87
13	II	0.01	30.3	0.03	0.77	2.78	0.85	18.6	7.13	90.0	34.4	162	35.0	348	65.4	795.44	0.27	246.72	1301.91
14	II	6.09	41.1	2.16	11.1	4.31	0.70	15.8	5.87	75.8	29.6	145	32.1	320	59.8	749.33	0.23	2.65	82.59
15	II	5.54	38.9	1.86	8.52	3.51	0.70	14.2	5.52	71.7	28.3	143	31.9	325	61.2	1544.77	0.26	2.83	109.20
16	II	1.88	31.3	0.63	3.43	2.38	0.60	14.1	5.55	74.3	29.5	149	33.3	338	65.4	749.71	0.24	6.73	282.82
17	II	0.01	32.7	0.03	0.84	2.68	0.73	17.1	7.39	94.2	36.9	180	38.9	390	72.8	873.97	0.25	265.52	1335.44
18	II	3.41	37.2	1.23	6.25	3.97	0.73	21.4	9.21	122	48.9	245	54.4	553	104	1623.69	0.19	4.25	253.56

注: $\delta Ce = 2(Ce)_N / (La + Pr)_N; \delta Eu = 2(Eu)_N / (Sm + Gd)_N$

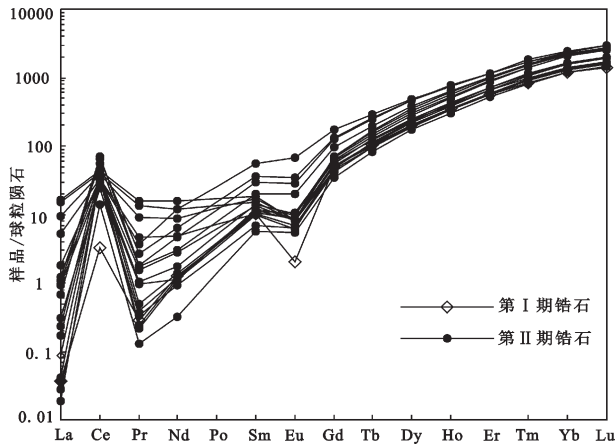


图8 黑云母花岗岩锆石稀土元素配分模式图(球粒陨石标准化值采用Taylor and McLennan 1985值^[23])

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from biotite granite(chondrite-normalized value after Taylor and McLennan, 1985^[23])

应该表现出较为明显的Sr和Eu负异常。由图6可知,矿区侵入岩弱(无)Eu负异常,Sr无负异常,指示矿区侵入岩与分离结晶无关(或关系不明显),而应为部分熔融所形成。La-La/Sm图解(图9-b)也反映岩浆演化过程主要受控于部分熔融作用。根据已测得Sr同位素数据^[5],矿区基性和酸性端元显示⁸⁷Sr/⁸⁶Sr与SiO₂具有良好的正相关,这一特征为岩浆混合提供了证据,这与前文分析的日阿侵入岩的壳幔混源岩浆互为佐证。因此,矿区双峰岩浆活动并

非分离结晶的产物,部分熔融在岩浆演化过程中占据支配地位。

4.3 成因及意义

双峰式火山岩主要产于大陆裂谷、板块扩张、洋内岛弧、活动陆缘和弧后扩张的早期阶段五种环境下^[31],而其形成于伸展环境下已成为多数地质工作者的共识。地球化学性质上,日阿双峰式均属高钾钙碱性系列/钾玄岩系列,富集大离子亲石元素Rb、K等,亏损高场强元素Nb、Ti等,具岛弧岩浆作用亲缘性。在(Y+Nb)-Rb图解显示黑云母花岗岩为同碰撞花岗岩(图10-a),而其他酸性端元和基性端元位于岛弧花岗岩区内^[32]。Ta/Yb-Th/Yb图解样品落在活动大陆边缘附近(黑云母花岗岩、其他酸性端元)和内部(基性端元)(图10-b),指示日阿双峰式岩浆活动与活动大陆边缘密切相关。上述特征与尕尔穷、嘎拉勒矿区极为相似,前人将这种现象解释为晚白垩世班公湖-怒江闭合后碰撞隆升所致^[33]。然而,何利等报道的措勤晚白垩世岩浆活动形成于岛弧(或活动大陆边缘)和同碰撞大地构造背景^[34]。结合下文分析,笔者倾向于冈底斯中北部措勤-申扎岩浆弧晚白垩世岩浆活动可能受雅鲁藏布江洋壳向北俯冲和北侧班公湖-怒江带碰撞造山双重控制,即形成于大陆俯冲背景下的弧后伸展和同碰撞挤压构造环境下。

巨型冈底斯构造-岩浆弧带作为喜马拉雅造山

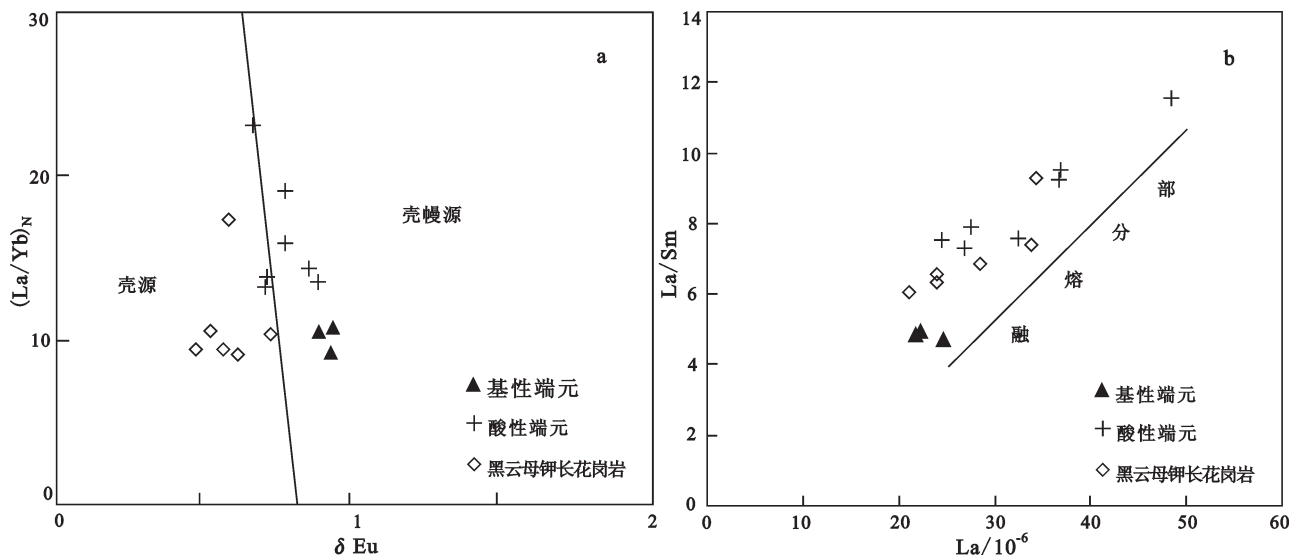


图9 黑云母花岗岩 $\delta Eu-(La/Yb)_N$ (a)和La-La/Sm(b)关系图

Fig.9 $\delta Eu-(La/Yb)_N$ (a) and La-La/Sm (b) diagrams of biotite granite

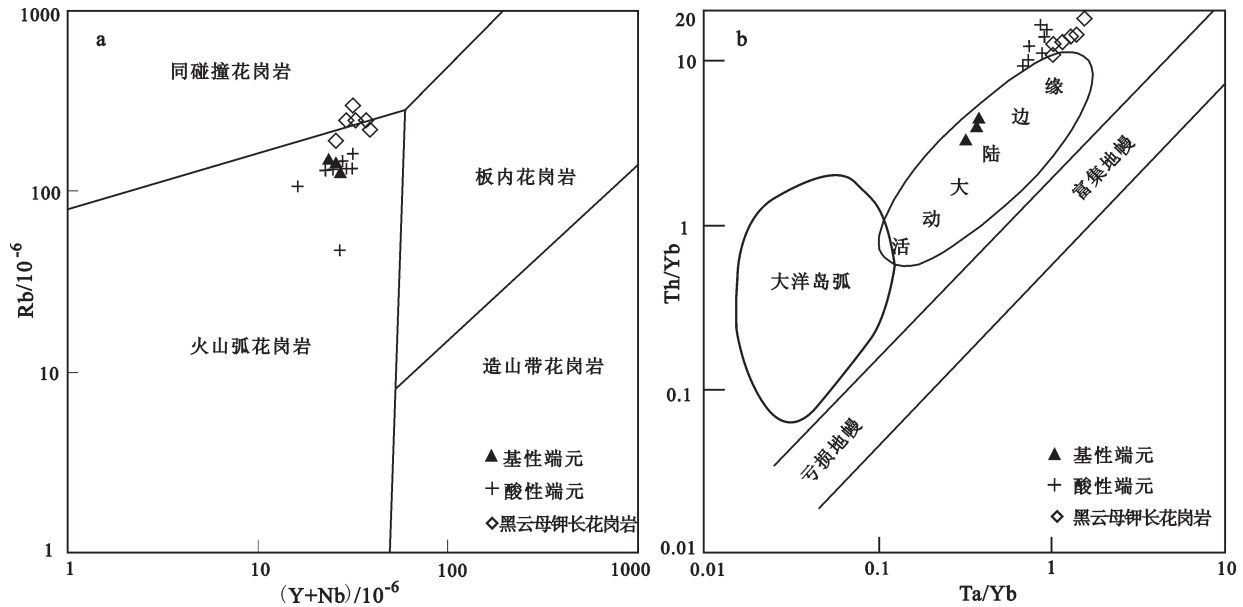


图10 黑云母花岗岩(Y+Nb)-Rb (a)和Ta/Yb-Th/Yb (b)关系图 (据[30])
Fig.10 (Y+Nb)-Rb (a) and Ta/Yb-Th/Yb (b) diagrams of biotite granite (after[30])

带的重要组成部分,夹持于北部班公湖—怒江和南部雅鲁藏布江两大缝合带之间,其形成过程与两大缝合带有着密切的关系。研究表明,羌塘地块和冈底斯地块于早白垩世开始对接碰撞,Kapp et al.^[35]和曲晓明等^[36]将时间限定在早白垩世初期,而部分学者认为其在早白垩世晚期碰撞^[37-40]。至晚白垩世早期,班公湖—怒江洋完全闭合,羌塘地块与冈底斯地块发生强烈的碰撞挤压造山^[37-38]。伴随着碰撞造山作用,在冈底斯地块北部的措勤—多瓦一带形成前陆盆地,以竟柱山组磨拉石沉积建造发育为特征,局部地段竟柱山组不整合于班公湖—怒江蛇绿岩之上^[37-38]。然而,此时冈底斯地块南侧的日喀则弧前盆地,正处于盆地主体地层昂仁组复理石细碎屑岩的强烈沉积发育时期^[41-42],其沉积物源主要是北侧岩浆弧内中酸性岩浆岩^[42],反映雅鲁藏布江洋壳正以低缓角度向北俯冲于冈底斯地块之下,在俯冲板片的前缘形成相关的弧后盆地。弧后盆地随着俯冲板片向北移动,冈底斯带岛弧火山岩由南向北逐渐变新即为其有利的证据。90 Ma左右,向北移动的弧后盆地在措勤—多瓦一带与前陆盆地叠加,形成措勤—多瓦弧后前陆复合盆地^[37-38, 43-44]。日阿铜矿床位于措勤—多瓦弧后前陆复合盆地的南缘,矿区内发育具同碰撞火山岩和岛弧火山岩亲缘

性的双峰式岩浆岩石组合,说明岩浆活动受到南侧雅鲁藏布江洋壳向北缓角度俯冲和北侧班公湖—怒江带碰撞造山作用的双重控制。这也就解释了为什么矿区侵入岩形成于弧后伸展和同碰撞挤压构造环境下。因此,认为尼雄矿田日阿铜多金属矿床侵入岩是受南羌塘地块与冈底斯地块强烈的碰撞挤压形成的前陆盆地和雅鲁藏布江洋壳平缓俯冲于冈底斯地块之下形成的弧后盆地联合控制。

矿区Pb同位素证明矿区双峰岩浆活动具OIB性质岩浆特征^[5],与川西裂谷双峰火山岩^[45]相似的Ti/Yb和Nb/Th等微量元素特征也指示了源区岩浆的OIB亲缘性^[2]。已有研究表明OIB性质岩浆是可以是俯冲洋壳所衍生的熔—流体交代MORB形成^[21, 46-47]。结合上述研究,可以将铜多金属矿床双峰岩浆活动描述为:89.9 Ma左右,由于向北缓角度俯冲的雅鲁藏布江和羌塘地块与冈底斯地块碰撞造山的共同作用,在措勤—多瓦形成弧后前陆复合盆地。俯冲的雅鲁藏布江洋壳板片衍生的熔—流体交代MORB,形成具OIB特征的岩浆,岩浆底侵引起下地壳部分熔融形成混源岩浆,由于岩浆的快速冷凝,导致岩浆房和地壳组分之间形成“冷凝壁”,从而使岩浆房相对处于封闭状态。由于重力分异作用,造成重的铁镁质矿物集中于岩浆房底部,相对较轻的长英质矿

物漂浮于岩浆房上部,即形成“双扩散”岩浆房^[45, 48-49]。上部酸性岩浆于89.9 Ma左右向上侵位结晶形成黑云母花岗岩,下部基性岩浆于87.2 Ma左右侵位至中地壳受到地壳物质的混染,结晶形成辉绿玢岩。岩浆侵位结晶过程分异出大量含有成矿元素的成矿热液流体,在有利围岩、物理化学条件下沉淀富集形成矿床。

5 结 论

(1)日阿铜多金属矿床东部矿区与成矿作用相关的黑云母花岗岩富硅(SiO_2 平均74.83%)、富碱($(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 均值8.71%),属钾玄岩系列,为典型的I型花岗岩;

(2)黑云母花岗岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(89.9\pm 1.6)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.30$),与矿区成矿年龄(金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄)和其他酸性和基性侵入岩SHRIMP锆石U-Pb年龄误差范围内一致,指示矿区多金属成矿作用与晚白垩世早期的岩浆活动密切相关;

(3)矿区双峰侵入岩源区为壳幔混源,部分熔融在岩浆形成和演化过程中发挥重要作用,双峰岩浆活动在南羌塘地块与冈底斯地块强烈的碰撞挤压和雅鲁藏布江洋壳平缓俯冲形成的弧后前陆复合盆地联合控制下形成;

(4)雅鲁藏布江洋壳板片衍生的熔-流体交代MORB形成的OIB性质岩浆底侵下地壳形成“双扩散”岩浆房,上部酸性岩浆先侵位结晶形成酸性岩,下部基性岩浆后侵位至中地壳遭受其混染,结晶形成基性岩。

致谢:野外地质考察得到江西省地质调查院胡为正、曹圣华等高级工程师,王卓、钱正江、杜昌法等工程师的帮助,电子探针分析得到东华理工大学核资源与环境重点实验室郭国林老师的指导,LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明教授、袁洪林教授和第五春荣博士的指导下完成,匿名审稿专家和编辑部李亚萍老师提出了建设性的修改意见,在此一并致以衷心的感谢!

参考文献(References):

[1] 吴旭铃, 陈振华. 西藏尼雄岩体岩石地球化学特征及其成因探讨[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 122-127.
Wu Xuling, Chen Zhenhua. Geochemistry and genesis of the

Nyixung rock body in northern Tibet[J]. *Geology in China*, 2005, 32(1): 122-127 (in Chinese with English abstract).

[2] 曲晓明, 辛洪波, 徐文艺, 等. 藏西措勤含铜双峰岩系的发现及其意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 707-716.
Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Xu Wenyi, et al. Discovery and significance of copper-bearing bimodal rock series in Coqin area of Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 707-716 (in Chinese with English abstract).

[3] 曹圣华, 李德威, 余忠珍, 等. 西藏冈底斯尼雄超大型富铁矿的成矿地质特征[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(3): 328-335.
Cao Shenghua, Li Dewei, Yu Zhongzhen, et al. Metallogenic and geological characteristics of the Nixiong superlarge magnetite deposit in Gangdese, Tibet[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(3): 328-335 (in Chinese with English abstract).

[4] 辛洪波, 曲晓明. 藏西措勤县日阿与斑(玢)岩有关的铜矿床的矿床地质特征与成矿时代[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 477-482.
Xin Hongbo, Qu Xiaoming. Geological characteristics and ore-forming epoch of Ri'a copper deposit related to bimodal rock series in Coqin County, western Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(4): 477-482 (in Chinese with English abstract).

[5] 辛洪波, 曲晓明, 任立奎, 等. 藏西措勤含铜岩系的物质来源与成因[J]. 地质学报, 2007, 81(7): 939-945.
Xin Hongbo, Qu Xiaoming, Ren Likui, et al. The material source and genesis of copper-bearing bimodal rock series in Coqin County, Western Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(7): 939-945 (in Chinese with English abstract).

[6] 袁健芽, 曹圣华, 罗小川, 等. 西藏措勤县尼雄夕卡岩铁铜矿田的发现及地质特征与找矿意义[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 88-94.
Yuan Jianya, Cao Shenghua, Luo Xiaochuan, et al. Discovery, characteristics and significance of the Nyixung skarn iron-copper field in Coqin County, Tibet[J]. *Geology in China*, 2008, 35(1): 88-94 (in Chinese with English abstract).

[7] 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏措勤尼雄矿体的岩石成因及其对富Fe成矿作用的潜在意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1793-1804.
Zhang Xiaoqian, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, et al. Petrogenesis of the Nixiong pluton in Coqin, Tibet and its potential significance for the Nixiong Fe-rich mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(6): 1793-1804 (in Chinese with English abstract).

[8] 于玉帅, 高原, 杨竹森, 等. 西藏措勤尼雄矿田滚斜铁矿侵入岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄与地球化学特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 1949-1960.
Yu Yushuai, Gao Yuan, Yang Zhusen, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geochemistry of intrusive rocks from Gunju iron deposit in the Nixiong ore field, Coqin, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(7): 1949-1960 (in Chinese with English abstract).

[9] 于玉帅, 杨竹森, 刘英超, 等. 西藏措勤尼雄矿田滚斜铁矿金云母矿物学特征及 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学[J]. 岩石矿物学杂志, 2012a, 31(5): 681-690.

- Yu Yushuai, Yang Zhusen, Liu Yingchao, et al. Mineralogical characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of phlogopite from the Gunjiu iron deposit in the Nixiong Ore Field, Coqen, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(5): 681-690 (in Chinese with English abstract).
- [10] 于玉帅, 杨竹森, 刘英超, 等. 西藏尼雄矿田日阿铜矿矽卡岩矿物学特征及地质意义[J]. *矿床地质*, 2012, 31(4): 775-790.
- Yu Yushuai, Yang Zhusen, Liu Yingchao, et al. Mineralogical characteristics of skarn in the Ri'a copper deposit of Nixiong ore field, Tibet, and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(4): 775-790 (in Chinese with English abstract).
- [11] 于玉帅, 杨竹森, 田世洪, 等. 西藏尼雄矿田滚钼铁矿成矿作用机制: 来自矿物学和稳定同位素证据[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 3815-3827.
- Yu Yushuai, Yang Zhusen, Tian Shihong, et al. Metallogenic mechanism of Gunjiu iron deposit in the Nixiong ore-field, Coqen, Tibet: Evidence from mineralogy and stable isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(11): 3815-3827 (in Chinese with English abstract).
- [12] Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning. Simultaneous hetereterminations of U-Pb Age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by Excimer Laser Ablation Quadrupole and Multiple Collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 100-117.
- [13] Andersen T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192: 59-79.
- [14] Foster M D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[J]. *U. S. Geol. Survey, Prof. Paper*, 1960, 354: 11-49.
- [15] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 花岗岩类与岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994, 210-212.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua, et al. *Magma-Dynamic of Granitoids—Theory, Method and a Case Study of the Eastern Hubei Granitoids*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994, 210-212 (in Chinese with English abstract).
- [16] 傅金宝. 斑岩铜矿中黑云母的化学组成特征[J]. *地质与勘探*, 1981, 9: 16-19.
- Fu Jinbao. The chemical composition and characteristics of biotite in porphyry copper deposits[J]. *Geology and Exploration*, 1981, 9: 16-19 (in Chinese).
- [17] Stone D. Temperature and pressure variations in studies of Archean Felsic plutonic rocks, Berens River Area, Northwest Superior Province, Ontario, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2000, 38: 455-470.
- [18] Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt[J]. *Trans R Soc Edinburgh, Earth Sci.*, 1992, 83:1-26.
- [19] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京, 地质出版社, 2003, 181-212.
- Han Yiwen, Ma Zhengdong. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003, 181-212 (in Chinese).
- [20] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 1974, 8: 173-174.
- [21] Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 2007, 97(1/2):1-29.
- [22] Rollison H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[J]. London: Longman Group UK Ltd, 1993, 1-27.
- [23] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell, 1985, 1-312.
- [24] Moeller A, O'Brien P J, Kennedy A, et al. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: An example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland, SW Norway[J]. *Geol. Soc. Spe. Publ*, 2003, 220: 65-81.
- [25] 刘文灿, 王瑜, 张祥信, 等. 西藏南部康马岩体岩石类型及其同位素测年[J]. *地学前缘*, 2004, 11(4): 491-501.
- Liu Wencan, Wang Yu, Zhang Xiangxin, et al. The rock types and isotope dating of the Kangmar gneissic dome in southern Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(4): 491-501 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王保弟, 许继峰, 刘保民, 等. 拉萨地块北部~90Ma斑岩型矿床年代学及成矿地质背景[J]. *地质学报*, 2013, 87(1): 71-80.
- Wang Baodi, Xu Jifeng, Liu Baomi, et al. Geochronology and ore-forming geological background of ~90Ma porphyry copper deposit in the Lhasa Terrane, Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(1): 71-80 (in Chinese with English abstract).
- [27] 吕立娜, 崔玉斌, 宋亮, 等. 西藏嘎拉勒矽卡岩型金(铜)矿床地球化学特征与锆石的 LA-ICP-MS 定年及意义[J]. *地学前缘*, 2011, 18(5): 224-242.
- Lü Lina, Cui Yubin, Song Liang, et al. Geochemical characteristics and zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Galale skarn gold (copper) deposit, Tibet and its significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(5): 224-242 (in Chinese with English abstract).
- [28] 姚晓峰, 唐菊兴, 李志军, 等. 班公湖—怒江带西段尔穷矽卡岩型铜金矿含矿母岩成岩时代的重新厘定及其地质意义[J]. *地质论评*, 2013, 59(1): 193-200.
- Yao Xiaofeng, Tang Jxing, Li Zhijun, et al. The redefinition of the ore-forming porphyry's age in Gaerqiong skarn-type gold-copper deposit, western Bangong Lake-Nujiang River metallogenic belt, Xizang (Tibet)[J]. *Geological Review*, 2013, 59(1): 193-200 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李胜荣, 孙丽, 张华锋. 西藏曲水碰撞花岗岩的混合成因: 来自成因矿物学证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 884-894.
- Li Shengrong, Sun Li, Zhang Huafeng. Magma mixing genesis of the Qushui collisional granitoids, Tibet, China: Evidences from genetic mineralogy[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 884-894 (in Chinese with English abstract).
- [30] Atherton M P and Petford N. Generation of sodium-rich magmas

- from Newly Underplated Basaltic Crust[J]. *Nature*, 1993, 362: 144–146.
- [31] Christian P, Paquette J I. Ammatie derived bimodal suite in the Hercynian Belt: Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the Late Devonian Brevenne Metavolcanics Massif Central (France) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1997, 29: 222–238.
- [32] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Petrology*, 1984, 73: 956–983.
- [33] 张志, 唐菊兴, 李志军, 等. 西藏尕尔旁-嘎拉勒铜金矿集区侵入岩岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 2013, 49(4): 676–688.
Zhang Zhi, Tang Juxing, Li Zhijun, et al. Petrology and geochemistry of intrusive rocks in the Ga'erqiong-Galale ore concentration area, Tibet and their geological implications[J]. *Geology and Prospecting*, 2013, 49(4): 676–688 (in Chinese with English abstract).
- [34] 何利, 马润则, 宋春彦. 西藏措勤晚白垩世侵入岩地球化学特征及构造环境[J]. *地质科技情报*, 2009, 28(5): 31–29.
He Li, Ma Runze, Song Chunyan. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Late Cretaceous intrusive rocks in Cuoqin, Tibet[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(5): 31–29 (in Chinese with English abstract).
- [35] Kapp P, Murphy M A, Yin A, et al. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of Western Tibet[J]. *Tectonics*, 2003, 22(4): 1–23.
- [36] 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 等. 西藏班公湖-怒江缝合带中段碰撞后A-型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束[J]. *地球化学*, 2012, 41(1): 1–14.
Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Du Dedao, et al. Ages of post-collisional A-type granite and constraints on the closure of the oceanic basin in the middle segment of the Bangonghu-Nuijiang suture, the Tibetan plateau[J]. *Geochimica*, 2012, 41(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- [37] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 521–533.
Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, et al. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 521–533 (in Chinese with English abstract).
- [38] 潘桂棠, 王立全, 李荣社, 等. 多岛弧盆系构造模式: 认识大陆地质的关键[J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32(3): 1–20.
Pan Guitang, Wang Liquan, Li Rongshe, et al. Tectonic model of archipelagic arc-basin systems: The key to the continental geology[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32(3): 1–20 (in Chinese with English abstract).
- [39] Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Niu Yaoling, et al. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2009, 268: 298–312.
- [40] Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, et al. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 301: 241–255.
- [41] 余光明, 王成善, 张哨楠. 西藏地区特提斯中生代沉积特征及沉积盆地演化[J]. *中国科学B辑*, 1989, 19(9): 982–990.
Yu Guangming, Wang Chengshan, Zhang Shaonan. Sedimentary characteristics and evolution of Xizang (Tibet) Tehys in Mesozoic Era[J]. *Science in China, Ser. B*, 1989, 19(9): 982–990 (in Chinese with English abstract).
- [42] 郝杰, 李曰俊. 日喀则残留型弧前盆地的构造与沉积演化[J]. *中国科学院研究生院学报*, 1997, 14(1): 51–56.
Hao Jie, Li Yuejun. Tectonic and sedimentary evolution of the Xigaze remnant-type forearc basin[J]. *Journal of Graduate School, Academia Sinica*, 1997, 14(1): 51–56 (in Chinese with English abstract).
- [43] Kapp P, Decelles P G, Gehrels G E, et al. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet [J]. *GSA Bulletin*, 2007, 119(7/8): 917–933.
- [44] 丁琳, 蔡福龙, 张清海, 等. 冈底斯-喜马拉雅碰撞造山带前陆盆地系统及构造演化[J]. *地质科学*, 2009, 44(4): 1–23.
Ding Lin, Cai Fulong, Zhang Qinghai, et al. Provenance and tectonic evolution of the foreland basin systems in the Gandese-Himalayan collisional orogen belt[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2009, 44(4): 1–23 (in Chinese with English abstract).
- [45] 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和Sm-Nd同位素制约及大地构造意义[J]. *地质科学*, 2002, 37(3): 264–276.
Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, et al. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanics in Western Sichuan and its tectonic implications: Geochemical and Sm-Nd isotopic constraints[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(3): 264–276 (in Chinese with English abstract).
- [46] Pin C, Paquette J L. A mantle-derived bimodal suite in the Hercynian belt: Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the late Devonian Brevenne metevolcanics, Massif Central (France) [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1997, 129: 222–238.
- [47] Bonin B. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, source? A review[J]. *Lithos*, 2004, 78: 1–24.
- [48] Macdonald R. Quaternary peralkaline silicic rocks and caldera volcanoes of Kenya in Fitton J G and Upton B G J. *Alkaline Ingeous Rocks*[J]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1987, 30: 313–333.
- [49] Chung Sunlin, Chen Hai, Jahn Borming, et al. Major and trace element, and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleogene volcanism in South China prior to the South China Sea opening[J]. *Lithos*, 1997, 40: 203–220.