

西藏尕尔穷铜金矿床花岗岩类的地球化学特征及其地球动力学意义

雷传扬, 李志军, 张 志, 胡正华, 王红星, 宋俊龙

成都理工大学, 四川成都 610059

摘 要: 尕尔穷铜金矿位于念青唐古拉板片与南羌塘板片之间的班公湖-怒江缝合带西段, 区内花岗岩类形成于燕山晚期, 主要为中酸性侵入岩, 以岩基、岩株、岩枝、岩脉等形态产出。岩石具有较低的 SiO_2 (52.92%~79.21%, 多数集中在 60%~65%, 平均为 63.64%) 和较高的 Al_2O_3 (10.43%~16.49%, 平均为 15.23), 高碱 ($\omega(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$: 4.86%~7.15%), $\omega(\text{Na}_2\text{O})/\omega(\text{K}_2\text{O})$ 比值变化较大 (0.26~2.26), 弱的负钕异常和负铈异常, 相对富集不相容元素 Rb、Th、K、Ce, 而 Ba、Ta、Nb、Ti 亏损。这些特征表明花岗岩类是准铝质-弱过铝质钙碱性 I 型花岗岩, 其源区物质可能是基性玄武质成分, 形成于与板块俯冲有关的活动大陆边缘的陆缘弧环境, 为深部地壳物质熔融后与幔源基性岩浆混合作用的产物。

关键词: 花岗岩类; 地球化学; 构造环境; 尕尔穷铜金矿; 西藏

中图分类号: P588.13; P594.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.04.20

Geochemical Characteristics and Geodynamic Significance of the Granites in the Ga'erqiong Cu-Au deposit, Tibet

LEI Chuan-yang, LI Zhi-jun, ZHANG Zhi, HU Zheng-hua, WANG Hong-xing, SONG Jun-long

College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059

Abstract: The Ga'erqiong Cu-Au deposit is located in the western segment of the Bangong Co-Nujiang suture zone between Nyainqentanglha slab and South Qiangtang slab, where the granites, composed mainly of middle acid intrusive rocks in the forms of batholith, stock, apophyse and vein, were formed in the Late Yanshanian period. The rock is characterized by comparatively lower SiO_2 (52.92%~79.21%, mostly 60%~65%, 63.64% on average) and higher Al_2O_3 (10.43%~16.49%, averagely 15.23), higher alkali ($\omega(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$: 4.86%~7.15%), $\omega(\text{Na}_2\text{O})/\omega(\text{K}_2\text{O})$ changeable ratio (0.26~2.26), weak Eu anomalies and weak Ce anomalies, comparative enrichment of incompatible elements, such as Rb, Th, K, Ce, and depletion of Ba, Ta, Nb and Ti. The characteristics show that the granite is metaluminous-weak peraluminous calc-alkaline I-type granite, and the source region provenance might have been basic basaltic components formed in the continental marginal arc of active continental margin connected to the plate subduction, being the product of the migmatization of the deep crustal melted material and the mantle source basic magma.

Key words: granites; geochemical characteristics; structural environment; Ga'erqiong Cu-Au deposit; Tibet

花岗岩类的地质学、岩石学和地球化学特征反映了岩浆的起源、形成和源区特征, 而岩浆的源区特征、形成过程以及侵位状态与其形成时的构造环境密切相关。因此, 花岗岩的地质学、岩石学和地

球化学特征在一定程度上可示踪其形成时的大地构造环境。尕尔穷铜金矿构造上位于念青唐古拉板片与南羌塘板片之间的班公湖-怒江缝合带西段, 该段的地质工作程度总体较低, 仅尕尔穷铜金矿达到详

本文由国家 973 项目(编号: 2011CB403103)、中央公益性行业科研专项(编号: 201011013-3)、青藏专项(编号: 1212011085529)和教育部岩石学矿床学国家重点(培育)学科建设项目(编号: SZD0407)联合资助。

收稿日期: 2012-05-29; 改回日期: 2012-06-12。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 雷传扬, 男, 1985 年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: lcy850610@126.com。

等形态产出, 据岩石种类可分为花岗斑岩($\gamma\pi_5^3$)、闪长玢岩($\delta\mu_5^3$)、石英闪长岩(δo_5^3)、花岗闪长岩($\gamma\delta_5^3$)、花岗闪长斑岩($\gamma\delta\pi_5^3$)、细晶岩(Z_5^3)等多个侵入体。岩体与地层之间呈侵入接触关系, 在岩体与灰岩、大理岩接触带形成矽卡岩。

2 岩相学特征

区内侵入岩主要是中性-中酸性岩体, 在石英闪长岩中见暗色微粒包体。各主要岩石类型的岩相学特征描述如下:

闪长玢岩($\delta\mu_5^3$): 灰色、灰白色, 斑状结构, 块状构造。斑晶粒径较大, 一般为 0.5~2 mm, 主要由斜长石组成, 占 10%~40%, 其次少量角闪石(5%~20%)和辉石(5%~10%); 基质由隐晶质、微粒至细粒斜长石、辉石、黑云母及少量石英组成。发育绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化。

石英闪长岩(δo_5^3): 灰色、灰白色, 中粗粒至细粒半自形粒状结构, 块状构造。由斜长石、角闪石、单斜辉石、黑云母和石英及少量金属矿物组成。斜长石含量 50%~75%, 中细粒自形-半自形板状, 无序散布。角闪石含量 10%~30%, 细粒浅绿色柱状, 常被黑云母、绿泥石交代。单斜辉石含量 5%~20%, 细粒不规则状或短柱状, 常被黑云母、角闪石交代, 或被碳酸盐交代。石英少量, 细粒不规则状, 充填长石粒间, 分布不均。

花岗闪长岩($\gamma\delta_5^3$): 浅灰、灰白色, 中细粒结构, 块状构造。主要矿物为斜长石(50%±)、石英(20%±)、钾长石(10%±)和角闪石(20%±), 含少量黄铁矿和黑云母。矿物多呈半自形-它形晶, 粒径多在

0.3~3 mm。沿裂隙可见绿帘石化、绿泥石化, 岩石内部蚀变不均匀。

花岗闪长斑岩($\gamma\delta\pi_5^3$): 浅灰、灰白色, 斑状结构, 块状构造。斑晶约 40%, 主要为斜长石(55%±)、石英(20%±)、钾长石(10%±)、角闪石(10%±)、黑云母(5%±), 斑晶粒径一般 0.36~1.5 mm。基质约 60%, 粒径一般为 0.02~0.2 mm。副矿物主要为锆石、磷灰石、金红石等。含蚀变矿物 5%~20%, 主要为绿泥石、粘土矿物, 其次有绢云母、碳酸盐矿物和钾、钠长石等。岩石中含有少量黄铁矿、磁黄铁矿。

花岗斑岩($\gamma\pi_5^3$): 浅肉红色、灰白色、灰色, 斑状结构, 块状构造。斑晶 20%~60%, 主要为钾长石(25%±)、斜长石(30%±)、石英(35%±)、角闪石(5%±)、黑云母(5%±), 斑晶粒径一般 2 mm。基质 35%~75%, 细粒结构或隐晶质结构。发育绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化、硅化、黄铁绢岩化、矽卡岩化。

细晶岩(Z_5^3): 灰白色、白色, 具斑状或细晶结构, 斑晶成分以针状角闪石为主, 基质为致密微晶长英质。斑晶含量较少, 约 10%~15%。与围岩接触带处多产生硅化、矽卡岩化。岩石内部矿化蚀变较弱。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

区内花岗岩类样品主元素分析结果如表 1 所示。样品的 SiO_2 较低, 介于 52.92%~79.21%之间, 但大多数集中在 60%~65%之间, 平均为 63.64%。 Na_2O 平均含量为 3.81%; 全碱含量 $\omega(Na_2O+K_2O)$ 为 4.86%~7.15%, 平均为 6.3%, $\omega(Na_2O)$ 普遍大于 $\omega(K_2O)$, $\omega(Na_2O)/\omega(K_2O)$ 比值变化较大, 在 0.26~

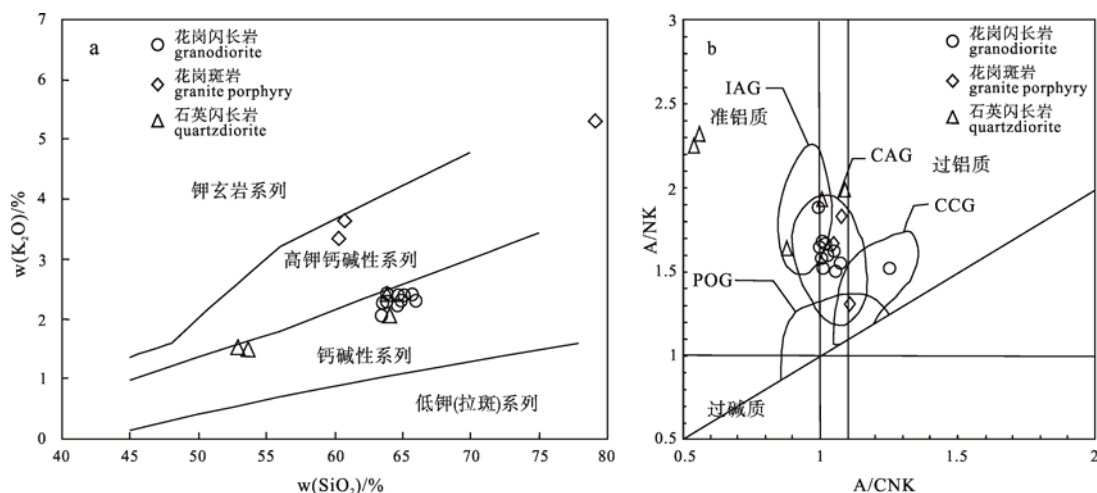


图 2 花岗岩类 SiO_2 与 K_2O 关系图解(a, 据 Rickwood, 1989)和 A/CNK - A/NK 图解(b, 据肖庆辉等, 2002)
Fig. 2 Diagrams of SiO_2 - K_2O (a, after Rickwood, 1989) and A/CNK - A/NK (b, after XIAO Qing-hui et al., 2002)

IAG-岛弧花岗岩类; CAG-大陆弧花岗岩类; CCG-大陆碰撞花岗岩类; POG-后造山花岗岩类

IAG-island arc granitoids; CAG-continental arc granite; CCG-continental collision granite; POG-post-orogenic granite

2.26 之间, 平均为 1.68, 里特曼指数为 1.23~2.36, 属钙碱性岩石, 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图中落入钙碱性系列岩石区(图 2a); Al_2O_3 含量较高, 介于 10.13%~16.49% 之间 0.88~1.11 之间, 平均为 15.23%, 铝饱和指数 A/CNK 介于 1.03, A/NK 介于 1.30~2.31 之间, 属于准铝质-弱过铝质系列(图 2b); CaO 含量随 SiO_2 含量增加变化很大, 介于 0.76~12.44 之间, 平均为 4.59; 样品总体特征表明区内花岗岩类主要为准铝质-弱过铝质钙碱性花岗岩系列。

3.2 稀土元素

区内花岗岩类稀土元素质量分数较低, ΣREE 介于 $75.85\times 10^{-6}\sim 196.74\times 10^{-6}$ 之间(表 2), 平均为 138.86×10^{-6} , 而花岗斑岩的稀土元素质量分数更低(平均值为 108.40×10^{-6}), 明显低于花岗闪长岩和石英闪长岩, LERR/HERR 值平均为 12.11, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均为 14.76, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 平均为 5.71, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 平均值为 1.73, 表明 LREE 富集, 分馏明显而 HREE 相对亏损, 分馏不明显。 δEu 平均为 0.84, 但是花岗斑岩的 δEu 值明显低于另外两者, 说明偏中性的岩浆演化过程中斜长石分离结晶作用不明显, 而酸性岩浆具有较强的斜长石的分离结晶。 δCe 平均为 0.97, 表明样品具有弱的 Ce 异常或无 Ce 异常。

花岗斑岩具有明显的负铕异常, 曲线形态近似于“海鸥型”; 花岗闪长岩和石英闪长岩岩性曲线特征基本相同, 稀土配分模式图呈较平缓的右倾型(图 3a), 无明显的铕异常。所有样品的轻稀土曲线倾斜程度高于重稀土, 说明轻稀土元素分馏程度明显高于重稀土元素, 反映了岩浆作用过程中轻重稀土之间发生了明显的分异作用。

3.3 微量元素

微量元素分析结果见表 3。由表 3 可知, 一些在基性岩中表现为相容的元素, 如 V、Cr、Ni 和 Co

等元素在花岗闪长岩、石英闪长岩中含量较花岗斑岩高, 而花岗斑岩中的 Ba、Rb、Th、Cs 等低场强元素及放射性元素 U 的含量高于石英闪长岩和花岗闪长岩; Ta、Hf 等高场强元素及 La、Yb 的含量低于石英闪长岩和花岗闪长岩, 其余元素的含量大致相当。区内花岗岩类样品微量元素分布模式图总体表现为向右倾的“多峰多谷”的形态(图 3b), 但总体特征相似。与原始地幔相比, 相对富集不相容元素 Rb、Th、K、Ce, 而 Ba、Ta、Nb、Ti 呈现低谷, 具与俯冲作用有关的大陆边缘弧火成岩的特征(Condie, 2001), 其中花岗斑岩具有更明显的 Sr 和 Ti 低谷。

4 讨论

4.1 岩体成因类型

区内花岗岩体存在多种类型岩石, 从闪长岩、石英闪长岩到花岗闪长岩和花岗岩斑岩均有发育。这些花岗岩体的矿物组成为以斜长石、角闪石和石英为主, 次要矿物为钾长石、辉石及黑云母, 副矿物可见磁铁矿和钛铁矿, 与俯冲机制下形成的含角闪石钙碱性花岗岩类(ACG)矿物组合(Bernard, 1999)一致。其岩石化学多以 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值接近或大于 1, 相对富集不相容元素 Rb、Th、K、Ce, 不同程度亏损 Nb、Ta、P 和 Ti 等, 显示了 I 型花岗岩的岩石地球化学特征(Chappell et al., 1992; 马乐天等, 2010; 杨合群等, 2009)。已有研究表明: I 型花岗岩的 SiO_2 含量与 P_2O_5 含量呈明显的负相关关系, 而 S 型花岗岩的 P_2O_5 含量随 SiO_2 含量的增加无明显降低的趋势(李献华等, 2007), 区内花岗岩类的 SiO_2 含量和 P_2O_5 含量呈明显的负相关关系, 属于 I 型花岗岩(图 4)。

4.2 岩浆源区特征

在碰撞造山的过程中, 大规模岩浆的形成除了热源条件外, 还取决于源区物质的成分(唐菊兴等,

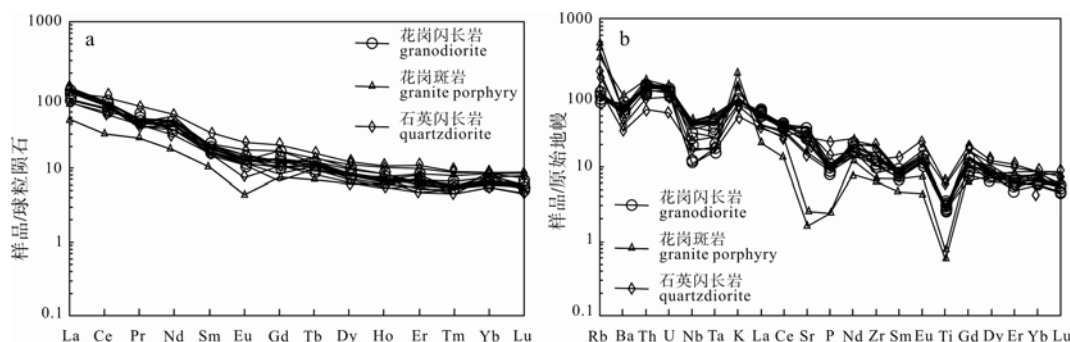


图 3 花岗岩类稀土元素配分曲线(a, 标准值据 Boynton, 1984)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, 标准值据 McDonough et al., 1992)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of granitoids (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace elements web diagram (b, normalization values after McDonough et al., 1992)

表 1 花岗质岩石岩石化学成分含量(%）、特征参数、CIPW 标准矿物及其含量
Table 1 Major elements composition (wt. %), characteristic parameters, CIPW and its content of granitoids

岩性	花岗闪长岩											花岗岩			石英闪长岩				
样品编号	L001	L002	L003	L004	L005	L006	L007	L008	L009	L010	L011	GEQ-4	803-118.5	405-220.4	GEQ-1	GEQ-2	407-221.8	303-175.2	GEQ-3
SiO ₂	64.02	64.72	63.98	64.05	65.36	65.61	64.71	64.50	64.74	63.66	65.04	60.33	60.83	79.21	63.82	63.86	64.03	53.68	52.92
Al ₂ O ₃	15.39	15.57	15.26	15.28	15.65	15.69	15.48	15.55	15.43	15.24	15.40	15.29	15.06	10.43	15.92	15.21	14.90	16.04	16.49
Fe ₂ O ₃	0.62	0.61	0.60	0.69	0.73	0.80	0.58	0.55	0.70	1.45	0.78	0.33	0.42	0.20	0.17	1.79	1.72	1.07	0.93
FeO	2.95	3.48	3.39	3.16	2.87	2.92	3.45	3.26	3.16	2.20	2.97	0.63	0.26	0.61	3.87	2.50	2.33	3.32	3.51
CaO	3.34	2.84	3.26	3.24	2.43	2.41	2.93	2.87	3.11	4.00	2.42	8.64	8.35	0.76	4.57	3.50	3.89	12.44	12.29
K ₂ O	2.32	2.31	2.29	2.30	2.38	2.33	2.28	2.39	2.27	1.99	2.39	3.34	3.63	5.32	2.39	2.40	2.04	1.49	1.52
Na ₂ O	4.13	4.37	4.05	4.08	4.60	4.82	4.40	4.64	4.43	3.61	4.48	3.34	2.59	1.37	4.35	3.06	3.36	3.37	3.34
MgO	1.85	2.03	1.86	1.89	1.90	1.69	2.02	1.78	2.03	1.49	1.81	0.38	0.36	0.22	2.15	2.54	2.57	5.06	5.13
MnO	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.03	0.04	0.05	0.08	0.03	0.05	0.13	0.12
P ₂ O ₅	0.23	0.23	0.20	0.20	0.20	0.19	0.22	0.19	0.21	0.20	0.19	0.20	0.20	0.05	0.21	0.18	0.19	0.31	0.34
TiO ₂	0.56	0.62	0.59	0.57	0.58	0.55	0.63	0.56	0.63	0.57	0.59	0.64	0.63	0.12	0.64	0.62	0.63	1.11	1.20
LOI	3.90	2.57	3.81	3.77	2.55	2.41	2.59	3.06	2.53	5.22	3.23	6.66	7.43	0.87	1.17	3.75	3.33	1.21	1.60
total	99.39	99.42	99.36	99.31	99.33	99.50	99.38	99.42	99.32	99.70	99.38	99.81	99.80	99.21	99.34	99.44	99.04	99.23	99.39
Q	20.93	20.35	21.13	21.23	20.9	20.3	20.06	18.62	19.89	25.2	21.5	16.04	20.17	49.50	15.45	26.01	24.99	1.08	0.05
Ab	36.60	38.20	35.90	36.14	11.13	11.04	13.56	13.5	14.49	19.63	11.2	30.34	23.73	11.79	37.49	27.07	29.71	29.09	28.90
An	14.36	14.06	14.18	14.25	40.24	42.03	38.49	40.75	38.68	32.29	39.44	21.19	23.23	31.97	14.39	14.83	12.6	8.98	9.19
Or	14.36	14.06	14.18	14.25	14.55	14.19	13.95	14.63	13.87	12.46	14.68	21.19	23.23	31.97	14.39	14.83	12.60	8.98	9.19
R ₁	2244	2159	2262	2259	2116	2057	2155	2046	2157	2521	2147	2157	2436	3579	2056	2587	2582	1921	1873
R ₂	787	733	775	775	683	669	741	727	761	848	677	1335	1307	302	925	835	874	1935	1936
DI	71.89	72.61	71.21	71.62	75.69	76.52	72.5	74	72.44	69.95	75.62	67.57	67.13	93.26	67.33	67.91	67.3	39.15	38.14
来源	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	①	②	②	①	①	②	②	①

注：资料来源为①邓世林等, 2011；②姚晓峰, 2010。本文数据测试单位：西南冶金地质测试所。分析方法：重量法、X 射线荧光法、滴定法。

表 2 花岗质岩石稀土元素丰度($\times 10^{-6}$)和特征参数
Table 2 REE abundance ($\times 10^{-6}$) and parameters of granitoids

岩性	花岗闪长岩								花岗斑岩					石英闪长岩			
样品编号	L001	L002	L003	L004	L005	L006	L007	L008	L009	L010	L011	GEQ-4	514-231	05-220.4	GEQ-10	03-175.2	07-221.8
La	33.72	38.25	38.95	34.33	35.90	34.32	36.89	34.70	36.62	33.86	34.42	27.30	24.50	14.90	33.80	23.40	27.30
Ce	59.98	67.13	67.35	58.94	61.53	59.50	64.07	60.52	63.80	59.39	61.52	54.60	45.10	24.10	76.80	48.30	52.80
Pr	4.75	5.85	5.28	5.21	4.77	4.46	5.59	5.20	5.89	4.53	4.83	5.52	4.96	3.13	8.80	5.72	5.74
Nd	19.98	25.00	21.75	31.08	27.93	22.70	26.74	25.30	27.18	23.25	24.14	19.00	16.80	10.60	33.20	22.10	20.10
Sm	3.36	3.94	3.58	3.52	3.30	3.02	3.85	3.70	4.15	3.15	3.27	3.10	3.10	2.06	6.04	4.26	3.59
Eu	0.89	1.11	0.97	0.97	0.91	0.82	1.03	1.01	1.13	0.86	0.91	0.85	0.55	0.32	1.70	1.27	1.08
Gd	2.20	3.29	3.58	4.50	3.33	1.74	3.42	2.72	2.96	2.71	3.09	2.77	2.82	2.03	5.36	4.35	3.40
Tb	0.51	0.60	0.56	0.57	0.55	0.48	0.58	0.56	0.66	0.51	0.55	0.40	0.44	0.34	0.77	0.64	0.48
Dy	2.55	3.03	2.69	2.72	2.57	2.28	2.74	2.87	3.25	2.36	2.64	2.05	2.56	2.02	4.00	3.67	2.58
Ho	0.49	0.61	0.51	0.51	0.47	0.42	0.54	0.54	0.62	0.44	0.51	0.39	0.55	0.45	0.78	0.74	0.51
Er	1.02	1.25	1.12	1.70	1.55	1.00	1.32	1.42	1.38	1.19	1.31	1.25	1.76	1.48	2.29	2.06	1.47
Tm	0.17	0.19	0.17	0.17	0.15	0.15	0.18	0.18	0.19	0.15	0.17	0.18	0.26	0.22	0.30	0.28	0.20
Yb	1.81	1.45	1.34	1.37	1.67	1.18	1.39	1.70	1.45	1.18	1.37	1.22	1.75	1.63	1.91	1.82	1.33
Lu	0.17	0.20	0.18	0.18	0.17	0.15	0.20	0.20	0.19	0.15	0.19	0.19	0.28	0.27	0.29	0.25	0.20
LREE	122.67	141.28	137.88	134.04	134.34	124.81	138.16	130.43	138.77	125.05	129.09	110.37	95.01	55.11	160.34	105.05	110.61
HREE	8.93	10.61	10.15	11.71	10.46	7.40	10.36	10.19	10.71	8.69	9.83	8.45	10.42	8.44	15.70	13.81	10.17
I REE/HREE	13.74	13.32	13.59	11.44	12.84	16.86	13.34	12.81	12.96	14.39	13.13	13.06	9.12	6.53	10.21	7.61	10.88
	ΣREE	131.60	151.89	148.03	145.75	144.80	132.21	148.52	149.48	133.73	138.93	129.32	120.03	75.85	196.74	138.17	134.89
δEu	0.94	0.92	0.82	0.74	0.83	1.00	0.85	0.93	0.94	0.88	0.87	0.87	0.56	0.47	0.90	0.89	0.93
δCe	1.01	0.97	0.99	0.95	0.98	1.00	0.96	0.97	0.95	1.00	1.01	1.01	0.93	0.81	1.05	0.98	0.97
来源	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	①	②	②	①	②	②

注: 资料来源为①邓世林等, 2011; ②姚晓峰, 2010。本文数据测试单位: 西南冶金地质测试所。分析方法: 质谱法(ICP-MS)。

表 3 花岗质岩石岩石微量元素丰度($\times 10^{-6}$)和特征参数
Table 3 Trace elements abundance ($\times 10^{-6}$) and parameters of granitoids

岩性	花岗闪长岩											花岗斑岩			石英闪长岩		
样品编号	L001	L002	L003	L004	L005	L006	L007	L008	L009	L010	L011	GEQ-4	14-231	15-220.4	EQ-10	13-175.2	17-221.8
Ba	410.00	373.30	434.00	408.60	396.40	383.60	357.00	416.30	356.80	472.00	365.30	620.00	01.00	416.00	240.00	206.00	317.00
Rb	62.81	60.99	61.95	62.71	58.52	55.79	60.45	63.21	57.45	49.75	58.95	185.00	42.00	322.00	124.00	75.60	110.00
Sr	457.20	723.80	505.20	452.50	700.00	714.90	734.50	655.60	731.90	479.80	703.10	341.00	53.10	33.50	347.00	377.00	306.00
Y	16.19	17.93	18.68	16.46	17.11	14.26	17.83	17.28	17.75	13.47	17.39	10.50	14.60	12.30	20.70	19.30	14.10
Zr	158.15	149.77	152.79	211.03	210.43	117.38	221.85	118.45	146.07	162.17	150.73	122.00	77.60	72.70	142.00	93.60	149.00
Nb	22.20	30.04	26.12	27.34	30.00	28.27	27.58	25.42	29.54	19.95	28.36	15.30	7.72	7.64	24.80	13.10	11.80
Th	10.42	10.45	10.18	10.73	10.31	10.02	10.86	10.19	10.74	8.98	9.52	12.30	12.40	10.20	7.30	5.24	9.14
Pb	48.32	48.43	32.96	16.75	15.60	15.36	13.56	11.37	12.37	11.62	10.87	21.80	28.20	27.90	11.40	24.00	4.92
Ga	17.25	15.27	16.58	16.46	15.48	15.07	15.00	15.96	14.38	18.00	14.20	17.30	9.05	10.00	20.70	19.10	17.40
Zn	52.63	59.65	58.97	44.85	52.93	54.24	53.60	54.64	54.74	56.14	54.74	35.30	13.80	10.20	83.00	66.20	17.80
Cu	23.72	27.04	25.20	22.05	21.19	28.85	39.50	38.73	28.65	18.80	19.59	28.50	49.00	38.70	15.40	280.00	115.00
Ni	25.10	25.69	26.60	48.10	24.33	21.46	26.58	22.34	23.58	24.34	19.60	19.00	3.06	3.65	8.60	33.70	40.50
V	55.08	64.96	61.23	56.93	58.92	58.11	62.14	60.11	62.57	58.33	60.61	80.30	13.60	9.74	163.00	214.00	88.50
Cr	30.57	41.21	39.03	95.13	36.25	27.71	35.42	28.96	28.89	28.46	22.20	41.30	7.34	6.30	7.35	70.30	81.00
Hf	8.10	8.72	7.96	8.33	7.76	7.28	8.78	7.45	9.11	6.67	7.27	3.63	2.67	2.73	3.61	2.82	3.89
Cs	3.46	4.55	3.50	3.62	4.65	5.10	5.18	3.14	4.91	7.86	10.34	15.60	5.95	6.48	4.95	3.28	10.70
Sc	7.00	7.74	7.20	7.44	7.46	6.65	7.58	6.77	7.40	5.80	6.78	10.30	4.76	2.99	16.70	29.00	12.30
Ta	1.56	2.00	1.66	1.83	2.13	1.97	1.64	1.62	1.40	1.00	1.65	0.99	0.67	0.72	1.27	0.72	0.77
Co	11.66	13.41	12.39	12.48	11.47	10.55	12.38	11.72	11.93	11.12	10.85	4.97	1.64	1.55	18.50	30.90	14.80
Pb	48.3	48.4	33	16.8	15.6	15.4	13.6	11.4	12.4	11.6	10.9	21.8	28.2	27.9	11.4	24.0	4.92
来源	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	①	②	②	①	②	②

注：资料来源为①邓世林等, 2011；②姚晓峰, 2010。本文数据测试单位：西南冶金地质测试所。分析方法：原子吸收法、质谱法、发射光谱法、原子荧光法、离子选择性电极法、分光光度法。

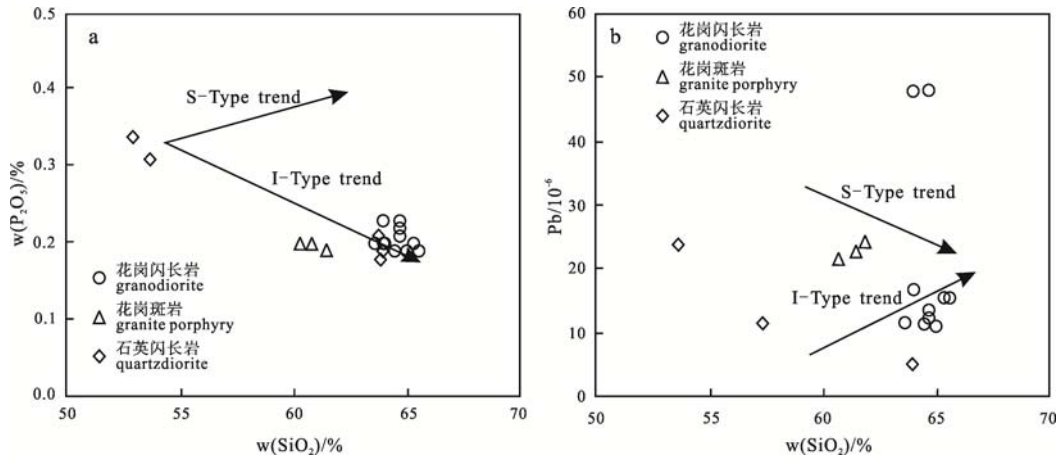


图4 花岗岩类的成因分类(据 Chappell et al., 1992)

Fig. 4 Genetic classification of granites(after Chappell et al., 1992)

2010), 而岩浆岩的成分特点与其源区成分、演化过程及物理化学条件有关(李国臣等, 2012)。已有研究证明源岩为泥质岩石、硬砂岩的熔融, 其形成的花岗质岩浆 Al 总是过饱和的, 即 $A/CNK > 1.1$ (Sylvester, 1998)。区内花岗岩类的 $A/CNK < 1.1$, 故不可能是由泥质岩石、硬砂岩等部分熔融形成。此外, 在水饱和的情况下, 绿片岩和角闪岩熔融形成的岩浆, 其 $A/CNK > 1.1$ (Beard et al., 1991)。但是角闪岩在水不饱和的条件下, 随着水压的降低, 脱水熔融形成岩浆的 A/CNK 逐渐由大于 1 变为小于 1, 同时 Al_2O_3 的含量随着熔融压力的增大而增加(马乐天等, 2010)。此外, 区内花岗岩类富 Na 、 Ca , 并具有较高的 K_2O/Na_2O 比值, 满足由角闪石脱水熔融形成的熔体的特征(赵永久等, 2007)。因此, 区内花岗质岩石的源岩为角闪石质岩石的可能性较大, 相当于基性玄武质成分。花岗岩的地球化学特征很大程度上取决于源区物质的性质, 因而以地壳成熟度较低的基性玄武质成分为主的源区物质决定了区内花岗岩主要以 I 型花岗岩的地球化学特征为特点。

由表 1 可知, 区内花岗闪长岩和石英闪长岩的 Na_2O 含量明显高于花岗斑岩, 前者平均值为 4.05%, 最高达 4.82%, 大多数在 4.5% 左右, 表明其形成压力接近 1.5 GPa, 及岩浆形成的深度接近 50 km (马乐天等, 2010; Winther, 1996), 而后者平均为 2.43, 与岩体演化程度升高有关, 其形成压力应与前者相似。已有研究表明: 上部陆壳的 Rb/Sr 比值大约为 0.32, 大陆壳平均为 0.24 (Taylor et al., 1991)。区内花岗闪长岩和石英闪长岩样品的 Rb/Sr 比值变化于 0.07~0.35, 平均值 0.13, 远远低于上部陆壳和大陆壳的平均值, 由此判断其物质源区很可能位于下地

壳和地幔交界范围; 而花岗斑岩样品随着演化程度升高, 其 Rb/Sr 比值也升高, 介于 0.54~9.61, 平均值 4.90, 远远高于上部陆壳和大陆壳的平均值, 但这并不意味着其物质源区位于上地壳范围, 因为其地球化学特征和野外观察表明其与前者具有同源性, 所以花岗斑岩物质源区与前者相似。该结论与根据 Na_2O 含量推断岩浆源区压力和深度得出的结论一致。另外, 岩石中 Sr 的含量大于 300×10^{-6} , Yb 含量小于 1.9×10^{-6} , La/Yb 平均值大于 20, Sr/Y 平均值大于 20, 这些地球化学特征表明: 岩浆源区残留相中无或仅有微量斜长石、石榴石和角闪石 (Castillo, 2006; 张旗等, 2010)。

另一方面, 区内仅有花岗斑岩样品具有中等的负 Eu 异常, 其它样品(可能代表了相对原始的岩浆, 其 SiO_2 的含量也相对较低)仅具有微弱的 Eu 异常(图 4a), 微弱的负 Eu 异常表明了源区有少量斜长石的存在, 而花岗斑岩样品中等的负 Eu 异常则应是斜长石分离结晶作用的结果, 因为其具有相对高的 SiO_2 含量。

4.3 成因探讨及大地构造环境分析

区内岩体具有弱片麻理构造, 指示它是主动侵位的, 而它明显具有沿构造带侵位的特点和接触变质带不宽, 指示应力不强。石英闪长岩存在岩浆混合现象, 证据有: ①包体与寄主岩石界线截然, 包体具细粒-微细粒岩浆结构, 是岩浆结晶产物, 而不是部分熔融的残留体(图 5)。②包体发育冷凝边是较高温度的基性岩浆团注入、裂解早期酸性岩浆形成, 证明存在岩浆混合且混合不均匀、不彻底。暗色包体为深色, 属于闪长质包体, 且粒度很细(0.1~mm), 属微粒包体, 大多数与石英闪长岩有着清晰的界线,



图 5 闪长玢岩中(a)的和石英闪长岩中(b)的暗色微粒包体
Fig. 5 Enclaves in diorite porphyrite (a) and in quartzdiorite (b)

形态多为球状、浑圆状、扁豆状和长条状, 直径从几到几十厘米不等, 最大可以达到 50 cm, 在岩体中分布不均匀, 未见定向。暗色微粒包体的存在提供了岩浆混合作用最直接、最有力的证据(Perugini et al., 2002; 李昌年, 2002), 表明岩体形成过程中发生了二端元岩浆混合作用, 且混合作用不彻底, 属于岩浆物理混合, 暗色闪长质微粒包体极大可能是代表了来自幔源的基性岩浆。此外, 岩体的稀土元素总量不高并有较大变化范围, 轻重稀土分馏明显, 弱的负 Eu 异常, 呈现壳幔混合花岗岩弱负 Eu 异常的右倾谱型(图 4a), 并较一致地富集 K、Rb、Sr 等 LILE, 相对贫化 HFSE(图 4b), 明显亏损 Nb、Ta (图 4b), 指示了壳、幔岩浆混合作用的结果, 同时反映其形成过程可能受到了俯冲带岛弧岩浆产物的影响。基于以上岩石学和地球化学证据, 认为区内花岗岩类为深部地壳物质熔融后与幔源基性岩浆混合作用的结果。

花岗岩类组成物质在受到源区组分控制的同时, 在一定程度上还受其形成构造背景及深部动力学条件的影响。

班公湖中特提斯洋盆打开时间约在 186.6~181.9 Ma, 其存在两条俯冲带: 北面的日土俯冲带和南面的狮泉河-改则俯冲带, 它们开始俯冲的时间分别是 165.5 ± 1.9 Ma 和 166.4 ± 2.0 Ma, 到侏罗纪末-白垩纪初洋盆闭合, 该洋盆存在时间大约有 40 Ma(曲晓明等, 2009)。前已述及, 区内花岗岩类形成深度接近 50 km, 显示此时的地壳已经加厚, 证实了狮泉河-改则俯冲带向南向拉萨地块之下俯冲的观点(邱瑞照等, 2004)。区内岩体的成岩年龄是 112.0 ± 2.3 Ma(曲晓明等, 2009), 此时的中特提斯洋

盆已经完全闭合, 构造环境应处于陆内俯冲阶段。

区内花岗岩类与含角闪石钙碱性花岗岩类(ACG)矿物组合(Bernard, 1999)一致, 该类岩石属于大洋板块俯冲到大陆板块之下在大陆上形成的岩浆弧岩石, 与比较成熟的俯冲带有关。但是影响花岗岩类的地球化学特征因素很多, 如源岩组成、部分熔融方式和程度、蚀变作用, 以及其后的岩浆演化过程(如分离结晶作用、岩浆混合作用、同化混染作用)等(吴福元等, 2007), 没有经历显著分离结晶作用的花岗质岩浆主要继承源岩的地球化学特征, 其

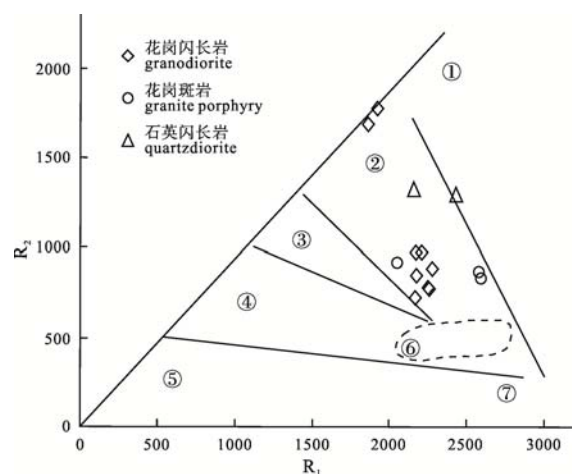


图 6 花岗岩类 R_1 - R_2 图解

(据 Batchelor et al., 1985)

Fig. 6 Diagrams of R_1 - R_2 for the granitoids (after Batchelor et al., 1985)

- ①-地幔分异花岗岩; ②-活动板块边缘花岗岩;
- ③-板块碰撞后隆起期花岗岩; ④-晚造山期花岗岩;
- ⑤-非造山花岗岩; ⑥-同碰撞花岗岩; ⑦-造山期后花岗岩
- ①-mantle fractionation granite; ②-pre-plate collision granite;
- ③-post-collision uplift granite; ④-late-orogenic granite;
- ⑤-anorogenic granite; ⑥-syn-collision granite;
- ⑦-post-orogenic granite

化学组成可以反映其源岩特征(吴福元等, 2007; Chappell et al., 1988)。区内花岗闪长岩和石英闪长岩未经明显的结晶分离作用, 富集 LREE 并较一致地富集 K、Rb、Sr 等 LILE, 相对贫化 HFSE(图 4b), 明显亏损 Nb、Ta(图 4b), 指示岩石的岩浆源区具有显著的俯冲带岛弧岩浆活动特点, 其形成机制很可能与狮泉河-改则俯冲带向南向拉萨地块之下俯冲-地壳增生事件有关。

中特提斯洋盆闭合后, 洋壳不断向南俯冲, 随后在狮泉河-改则俯冲带发生了陆内俯冲。俯冲的板片沉积物脱水形成了高碱富 LILE 贫 HFSE 的流体。流体上侵导致其上地幔楔发生部分熔融形成幔源基性岩浆, 在密度差的作用下这些幔源基性岩浆上侵, 其所携带的热烘烤上部地壳物质, 最终将导致地壳物质熔融形成大量壳幔二元岩浆混合体。在图 6 中 ($R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$; $R_2=6Ca+2Mg+Al$), 样品投在活动大陆边缘构造环境, 上述表明, 区内花岗岩类形成于活动大陆边缘的陆缘弧构造环境。

综上所述, 岩石学和地球化学特征表明, 区内花岗岩类具有俯冲带花岗岩类的特征, 形成于与板块俯冲有关的活动大陆边缘的陆缘弧环境中, 为深部地壳物质熔融后与幔源基性岩浆混合作用的产物。

5 结论

(1) 尔穷铜金矿矿区花岗岩类主要为闪长玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、花岗斑岩、细晶岩; 主元素化学成分具有低硅、富铝、富钠和铁、镁、钙含量较低的特征, 岩石属钙碱性准铝质到弱过铝质 I 型花岗岩类; 稀土元素配分曲线显示弱的负铈异常和负铈异常。

(2) 区内花岗岩类物源可能是角闪石质岩石, 相当于基性玄武质成分。区内花岗岩类具有俯冲带花岗岩类的特征, 形成于与板块俯冲有关的活动大陆边缘的陆缘弧环境中, 为深部地壳物质熔融后与幔源基性岩浆混合作用的产物。

致谢: 中国地质科学院矿产资源研究所唐菊兴研究员在文章的成文和修改过程中提出了建设性的意见和建议, 西藏卓朗矿业投资有限公司资助野外工作, 在此一并表示真诚的感谢。

参考文献:

邓世林, 唐菊兴, 李志军, 姚晓峰, 王友. 2011. 西藏尔穷铜金矿床岩体地球化学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学

版), 38(1): 85-91.

李昌年. 2002. 岩浆混合作用及其研究评述[J]. 地质科技情报, 21(4): 49-54.

李国臣, 丰成友, 王瑞江, 马圣钊, 李洪茂, 周安顺. 2012. 新疆白干湖钨锡矿田东北部花岗岩锆石 SIMS U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地球学报, 33(2): 216-226.

李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 52(9): 981-991.

马乐天, 张招崇, 董书云, 张舒, 张东阳, 黄河. 2010. 南天山英买来花岗岩的地质、地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 35(6): 908-920.

邱瑞照, 周肃, 邓晋福, 李金发, 肖庆辉, 蔡志勇. 2004. 西藏班公湖-怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定——兼论班公湖-怒江蛇绿岩带形成时代[J]. 中国地质, 31(3): 262-268.

曲晓明, 王瑞江, 辛洪波, 赵元艺, 樊兴涛. 2009. 西藏西部与班公湖特提斯洋盆俯冲相关的火成岩年代学和地球化学[J]. 地球化学, 38(6): 523-535.

唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫估, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李磊, 王友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 31(4): 495-506.

王红星, 姚晓峰, 李志军, 胡正华, 张志. 2012. 西藏革吉县尔穷铜金矿区岩石地球化学勘查异常特征及找矿方向[J]. 地球学报, 33(4): 693-702.

吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.

肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 洪大卫, 莫宣学, 卢欣祥, 李志昌, 汪雄武, 马昌前, 吴福元, 罗照华, 王涛. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社.

杨合群, 李英, 李文明, 杨建国, 赵国斌, 王小红. 2009. 北山花岗岩 S 型/I 型空间变化规律及含矿性[J]. 地球学报, 30(5): 627-633.

姚晓峰, 唐菊兴, 李志军, 邓世林, 胡正华, 张志. 2012. 西藏尔穷铜金矿床 S、Pb 同位素地球化学特征——成矿物质来源示踪[J]. 地球学报, 33(4): 528-536.

姚晓峰. 2010. 西藏革吉县尔穷砷卡岩型铜金矿成矿岩浆岩特征及其含矿性研究[D]. 成都: 成都理工大学.

张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2010. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志[J]. 岩石学报, 26(4): 985-1015.

张志, 唐菊兴, 杨毅, 李志军, 姚晓峰, 邓世林, 王红星, 宋俊龙. 2012. 西藏尔穷铜金矿元素空间分布规律及地球化学勘查模型[J]. 地球学报, 33(4): 663-672.

- 赵永久, 袁超, 周美夫, 颜丹平, 龙晓平, 李继亮. 2007. 川西老君沟和孟通沟花岗岩的地球化学特征、成因机制及对松潘-甘孜地体基底性质的制约[J]. 岩石学报, 23(5): 995-1006.
- 赵元艺, 刘妍, 王瑞江, 崔玉斌, 宋亮, 吕立娜, 曲晓明. 2010. 西藏班公湖-怒江成矿带及邻区铋矿化带的发现与意义[J]. 地球学报, 31(2): 183-193.

References:

- BATCHELOR R A, BOWDEN P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55.
- BEARD J S, LOFGREN G E. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb[J]. *Journal of Petrology*, 32(2): 365-401.
- BERNARD B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46(3): 605-626.
- BOYNTON W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[M]// HENDERSON P (Ed). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier: 63-114.
- CASTILLO P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257-268.
- CHAPPELL B W, WHITE A J R. 1992. I-and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1-2): 1-26.
- CONDIE K C. 2001. *Mantle Plumes and Their Record in Earth History*[M]. London: Cambridge University Press.
- DENG Shi-lin, TANG Ju-xing, LI Zhi-jun, YAO Xiao-feng, WANG You. 2011. Geochemical Characteristics of Rock mass in the Gaerqiong Cu-Au deposit, Tibet[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(1): 85-91(in Chinese with English abstract).
- LI Chang-nian. 2002. Comment on the Magma Mixing and Their Research[J]. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 49-54(in Chinese with English abstract).
- LI Guo-chen, FENG Cheng-you, WANG Rui-jiang, MA Sheng-chao, LI Hong-mao, ZHOU An-shun. 2012. SIMS Zircon U-Pb Age, Petrochemistry and Tectonic Implications of Granitoids in Northeastern Baiganhue W-Sn Orefield, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(2): 216-226(in Chinese with English abstract).
- LI Xian-hua, LI Wu-xian, LI Zheng-xiang. 2007. On the Genetic Classification and Tectonic Implications of the Early Yanshanian Granitoids in the Nanling Range, South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873-1885.
- MA Le-tian, ZHANG Zhao-chong, DONG Shu-yun, ZHANG Shu, ZHANG Dong-yang, HUANG He. 2010. Geology and Geochemistry of the Yingmailai Granitic Intrusion in the Southern Tianshan and Its Implications[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 35(6): 908-920(in Chinese with English abstract).
- MCDONOUGH W F, SUN S S, RINGWOOD A E, JAGOUTZ E, HOFMANN A W. 1992. Potassium, rubidium, and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001-1012.
- PERUGINI D, POLI G, PROSPERINI N. 2002. Morphometric analysis of magmatic enclaves: a tool for understanding magma vesiculation and ascent[J]. *Lithos*, 61(3-4): 225-235.
- QIU Rui-zhao, ZHOU Su, DENG Jin-fu, LI Jin-fa, XIAO Qing-hui, CAI Zhi-yong. 2004. Dating of Gabbro in the Shemalagou Ophiolite in the Western Segment of the Bangong Co-Nujiang Ophiolite Belt, Tibet: With a Discussion of the Age of the Bangong Co-Nujiang Ophiolite Belt[J]. *Chinese Geology*, 31(3): 262-268(in Chinese with English abstract).
- QU Xiao-ming, WANG Rui-jiang, XIN Hong-bo, ZHAO Yuan-yi, FAN Xing-tao. 2009. Geochronology and geochemistry of igneous rocks related to the subduction of the Tethys oceanic plate along the Bangong Lake arc zone, the western Tibetan Plateau[J]. *Geochimica*, 38(6): 523-535(in Chinese with English abstract).
- RICKWOOD P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247-263.
- SYLVESTER P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1-4): 29-44.
- TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, WANG Xiong-wu, ZHONG Kang-hui, YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, LI Feng-ji, GUO Na, QIN Zhi-peng, YAO Xiao-feng, LI Lei, WANG You, TANG Xiao-qian. 2010. Geological Features and Metallogenic Model of the Jiama Copper-Polymetallic Deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).

- TAYLOR S R, MCLEANNAN S M. 1991. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[M]. Oxford: Blackwell Press.
- WANG Hong-xing, YAO Xiao-feng, LI Zhi-jun, HU Zheng-hua, ZHANG Zhi. 2012. Lithogeochemical Anomaly Characteristics and Ore-Search Targeting of the Gaerqiong Gold-Copper Ore District in Ge'gyai County, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 693-702(in Chinese with English abstract).
- WINTHER K T. 1996. An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts[J]. *Chemical Geology*, 127(1-3): 43-59.
- WU Fu-yuan, LI Xian-hua, YANG Jin-hui, ZHENG Yong-fei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238(in Chinese with English abstract).
- XIAO Qing-hui, DENG Jin-fu, MA Da-quan, HONG Da-wei, MO Xuan-xue, LU Xin-xiang, LI Zhi-chang, WANG Xiong-wu, MA Chang-qian, WU Fu-yuan, LUO Zhao-hua, WANG Tao. 2002. The Ways of Investigation on Granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- YANG He-qun, LI Ying, LI Wen-ming, YANG Jian-guo, ZHAO Guo-bin, WANG Xiao-hong. 2009. Spatial Variation Regularity and Ore Potential of S-type and I-type Granites in the Beishan Mountain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(5): 627-633(in Chinese with English abstract).
- YAO Xiao-feng, TANG Ju-xing, LI Zhi-jun, DENG Shi-lin, HU Zheng-hua, ZHANG Zhi. 2012. S, Pb Isotope Characteristics of the Ga'erqiong Gold-Copper Deposit in Tibet: Tracing the Source of Ore-forming Materials[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 528-536(in Chinese with English abstract).
- Yao Xiao-feng. 2010. The Study of Minerogenic Magmatite Characteristic and It's Ore-bearing Potential of Gaerqiong Copper-Gold Deposit, Geji County, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qi, JIN Wei-jun, LI Cheng-dong, WANG Yuan-long. 2010. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985-1015(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhi, TANG Ju-xing, YANG Yi, LI Zhi-jun, YAO Xiao-feng, DENG Shi-lin, WANG Hong-xing, SONG Jun-long. 2012. Element Spatial Distribution of the Gaerqiong Copper-gold Deposit in Tibet and Its Geochemical Exploration Model[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 663-672(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yong-Jiu, YUAN Chao, ZHOU Mei-fu, YAN Dan-ping, LONG Xiao-ping, LI Ji-liang. 2007. Geochemistry and petrogenesis of Laojungou and Mengtonggou granites in western Sichuan, China: constraints on the nature of Songpan-Ganzi basement[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 995-1006(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yuan-yi, LIU Yan, WANG Rui-jiang, CUI Yu-bin, SONG Liang, LÜ Li-na, QU Xiao-ming. 2010. The Discovery of the Bismuth Mineralization Belt in the Bangong Co-Nujiang Metallogenic Belt of Tibet and its Adjacent Areas and Its Geological Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(2): 183-193(in Chinese with English abstract).