第87卷 第11期
2013年11月
地 质 学 报 ACTA GEOLOGICA SINICA
Vol. 87 No. 11
Nov. 2013

西藏更乃矽卡岩型铁多金属矿床地球化学特征、年代学及意义

李小赛[1)],赵元艺[2)],王江朋[3)],许虹[1)]
1) 中国地质大学(北京),北京,100083;
2) 中国地质科学院矿产资源研究所/国土资源部成矿作用与矿产资源评价重点实验室,北京,100037;
3) 新疆地质矿产局第一地质大队,乌鲁木齐,831100

内容提要:西藏更乃矽卡岩矿床位于班公湖-怒江成矿带南侧,具有良好的铁与铟等多金属成矿潜力,尤其在该矿床发现了自然铟与羟铟石,为国内首次。更乃矿床为晚白垩世似斑状二长花岗岩侵位于下白垩统郎山组灰岩时发生双交代作用的产物,晚白垩世似斑状二长花岗岩为更乃矽卡岩型铁多金属矿床的矿化提供了岩浆热液来源。似斑状二长花岗岩K_2O/Na_2O为1.38~1.73,显示富钾特征。铝过饱和指数(A/CNK)变化于1.02~1.05之间,为过铝质系列,具S型花岗岩特征。里特曼指数(σ)为2.15~2.31,属钙碱性岩石系列。富集大离子亲石元素Rb、Th,贫Sr、Ba、P、Ti等元素。$\sum$REE=108.03×10^{-6}~258.74×10^{-6},稀土元素总量较高,$(La/Yb)_N$为15.71~26.00,轻重稀土元素明显分异,Eu呈中等负异常(δEu=0.17~0.24)。似斑状二长花岗岩中锆石多呈柱状,Th/U的范围为0.50~2.17,$(La/Yb)_N$为0.00~0.29,轻重稀土元素明显分异,δCe=4.32~1293.43,δEu=0.06~0.13,具有比较高的Ce正异常和中等的Eu负异常,显示岩浆锆石的特征。更乃岩体形成于班公湖-怒江洋向南俯冲结束之后的同碰撞阶段。研究表明,铟与锡之间以及铟与锌之间不存在相关关系,铟与铁之间具有很好的正相关关系,铟在铁矿石中含量为5.61×10^{-6}~125.00×10^{-6},平均值为49.01×10^{-6},铟呈独立矿物形式存在。铁、铟、铋金属的矿化是在同一期热液活动中形成,为岩浆来源。锆石的LA-ICP-MS定年结果表明,岩体的形成年龄为78.7±1.7 Ma,为燕山晚期岩浆活动的产物。

关键词:LA-ICP-MS锆石测年;矽卡岩型铁多金属矿床;更乃矿床;铟、羟铟石;西藏

西藏更乃矿床位于那曲地区班戈县普保镇,北距班戈县城约40 km处,大地构造位置上位于班公湖-怒江成矿带中段南侧。班公湖-怒江成矿带隶属于特提斯-喜马拉雅成矿域,是东特提斯构造域中晚古生代以来具有独特演化历程的一个多岛弧碰撞造山带(Pan et al.,1997)。在该成矿带及其附近分布着许多铜金-铜铁-铜铅锌钼多金属矿床,由西向东,以材玛、弗野矽卡岩型铁矿,尕尔穷、嘎拉勒矽卡岩型铜金铁矿,多不杂斑岩型铜金矿,舍索矽卡岩型铜铅锌钼矿,雪如、查朗拉矽卡岩型铜铁矿,拉屋矽卡岩型铜铅锌矿等为代表。整个成矿带以矽卡岩型铜多金属矿床为主(赵元艺等,2010b),近年来,又发现了铟、铋等重要资源,因此,该成矿带也可能是一条重要的铟和铋成矿带(赵元艺等,2010a,2010b;吕立娜等,2011;刘妍等,2011)。更乃矿床是该成矿带上发现的一个矽卡岩型富铟的铁多金属矿床,在国内首次发现了自然铟与羟铟石(赵元艺等,2010a,2010b),该矿床为晚白垩世似斑状二长花岗岩侵位于下白垩统郎山组灰岩时发生双交代作用而形成,晚白垩世似斑状二长花岗岩为其矿化提供了岩浆热液来源。区内人迹罕至,缺少对其地质方面的科学研究,本文从花岗岩的地球化学、年代学以及矿床成矿作用等方面对其进行详细的研究,为整个成矿带寻找相似矿床提供理论基础,具有较重要的填补空白的价值。

1 成矿地质特征

西藏区内分布着金沙江缝合带、班公湖-怒江缝

注:本文为国家"973"项目(编号2011CB403103)、国际地学计划项目(编号IGCP/SIDA-600)、国家科技支撑课题(编号2006BAB01A05)与中国地质调查局青藏专项(编号1212010818097)共同资助成果。
收稿日期:2013-01-29;改回日期:2013-05-26;责任编辑:周健。
作者简介:李小赛,男,1987年生。硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:857920105@qq.com。通讯作者:赵元艺,研究员,主要从事矿床学与地球化学研究。Email:yuanyizhao2@sina.com。

合带、雅鲁藏布江缝合带。其中，班公湖-怒江缝合带横贯青藏高原，东西延伸长逾 2000 km，羌塘地块位于该带的北侧，南侧为冈底斯带(图 1)。在该缝合带及其邻区，分布有大规模的燕山早期陆缘火山岩，为一套含大量火山碎屑岩的以安山质为主的玄武-安山质流纹岩组合，火山作用晚期岩浆成分向碱性演化，以陆中心式喷发为主，兼具熔岩溢流特点(西藏地质矿产局，2000)。岩浆的深成侵入作用发生在早白垩世至晚白垩世早期，以中酸性幕式侵入为特点，岩体一般呈岩株或小岩基沿东西向呈带状分布，岩性主要有石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、似斑状花岗岩及花岗斑岩，年龄在 70～140 Ma 之间(西藏地质矿产局，2000)。岩浆侵入早期岩石一般偏基性，铝不饱和，具 I 型花岗岩特征，到晚期岩石酸性增强，铝过饱和，显示 S 型花岗岩的特征(曲晓明等，2006)。

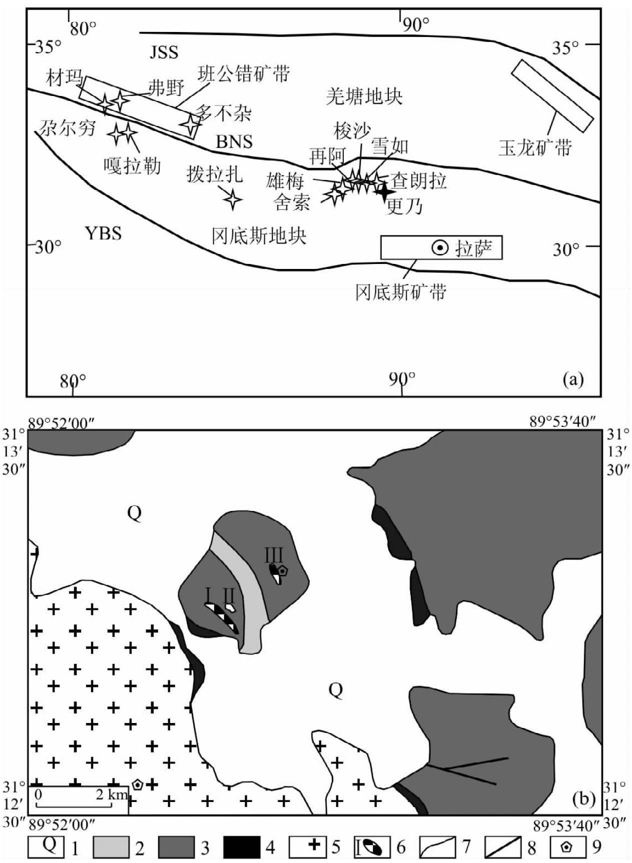

图 1 更乃矽卡岩型铁多金属矿床区域位置图(a)(据芮宗瑶等，2003 修改)及地质图(b)(据柴建玉等[1]修改)

Fig. 1 Regional location map (a) (modified from Rui Zongyao et al., 2003) and geological map (b) (modified from Chai Jianyu et al.[1]) of Gengnai skarn-type iron polymetallic deposit

JSS—金沙江缝合带；BNS—班公湖-怒江缝合带；YBS—雅鲁藏布江缝合带；1—第四系沼泽堆积物－残坡沉积物；2—下白垩统郎山组灰岩；3—下白垩统郎山组大理岩；4—矽卡岩；5—晚白垩世中粒二长花岗岩；6—矿体及编号；7—地质界线；8—断层；9—采样位置

JSS—Jinshajiang suture zone; BNS—Bangong-Nujiang suture zone; YBS—Yarlungzangbo suture zone; 1—swamp deposits-residual and talus material of Quaternary; 2—limestone of Langshan Fm of lower Cretaceous; 3—marble of Langshan Fm of lower Cretaceous; 4—skarn; 5—medium grained monzonitic granite of late Cretaceous; 6—orebody and number; 7—geological boundary; 8—fault; 9—collection point of porphyritic monzonitic granite

更乃矿区出露地层主要为下白垩统郎山组(K_1l)及第四系，郎山组(K_1l)为一套碳酸盐岩夹碎屑岩建造，主要岩性为浅灰白色、灰白色大理岩，灰色—灰黑色黑云母大理岩，灰色—深灰色含生物碎屑灰岩夹少量砂岩，总体向南西倾，倾向 220°～238°，倾角 40°～58°。更乃矿区岩浆岩为晚白垩世酸性侵入岩，岩性主要为似斑状二长花岗岩，呈岩株或小岩基形式产出，分布于矿区南西部，侵位于下白垩统郎山组地层。区内构造不甚发育，仅见部分北西西—南东东向断裂构造。

在岩体与下白垩统郎山组外接触处发育热接触变质作用，蚀变发育，主要蚀变类型有大理岩化、矽卡岩化、硅化及碳酸盐化。其中，矽卡岩主要为石榴子石-透辉石-绿帘石矽卡岩。矽卡岩中多发生铜铁等金属的矿化，在石英、方解石中及孔隙边缘发现包裹有自然铟或自然铋。区内新发现 3 个铁矿体，铁矿物主要为磁赤铁矿，均分布于岩体与地层的外接触带上或附近，矿体主要赋存于大理岩及灰岩中，自西向东依次为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号矿体。其中，Ⅰ号矿体赋存似斑状二长花岗岩岩体与郎山组灰岩夹砂岩外接触带上，矿体在地表出露，长 60 m，宽 17 m。矿石呈黑色，具细粒结构，块状构造，次生矿物为褐铁矿等，沿裂隙伴生有黄铜矿化现象。该矿体顶板为弱矽卡岩化大理岩，底板为强烈矽卡岩化大理岩及砂岩。Ⅱ号矿体主要赋存郎山组蚀变灰岩夹砂岩中，矿体在地表出露，长 30 m，宽 17 m。矿石呈黑色褐色，具细粒结构，块状构造，次生矿物为褐铁矿等。该矿体顶板为夕卡岩化钙质砂岩、底板为夕卡岩化的大理岩。Ⅲ号矿体主要产于郎山组大理岩中，赋存于近南北向断裂构造带中，矿体长 50 m，宽 30 m。矿石呈黑色褐色，致密块状构造，中细粒结构。该矿体顶、底板围岩均为大理岩，其中顶板夕卡岩化较弱，底板矽卡岩化较强。矿体的脉石矿物主要为方解石、石英、绿帘石、阳起石等。

2　样品与分析测试

2.1　样品采集

用于主量元素、微量元素和稀土元素分析的似斑状二长花岗岩样品编号为 GN-11-1-6、GN-11-3-10(2)、GN-11-5-2，用于锆石测年的似斑状二长花岗岩样品编号为 GN-11-1-4。GN-11-1-4、GN-11-1-6 采集点 GPS 坐标为：89°58′41″E，31°12′13″N，海拔 5078 m；GN-11-3-10(2) 采集点 GPS 坐标为：89°56′55″E，31°11′59″N，海拔 4944 m；GN-11-5-2 采集点 GPS 坐标为：89°52′19″E，31°12′35″N，海拔 5047 m（图 1）；矿石采自Ⅲ号矿体（图 1）。

2.2　样品特征

更乃似斑状二长花岗岩样品标本总体呈浅肉红色，似斑状结构，块状构造。斑晶为钾长石，肉红色，板状，10～20 mm，钾长石斑晶约占岩石总量的 15%。基质具花岗细晶结构，主要由斜长石（约 30%）、钾长石（约 25%）、石英（约 15%）、黑云母（约 10%）等矿物组成，含少量角闪石（小于 2%）。斜长石，灰白色，半自形板状，0.3～1 mm，偶见聚片双晶。钾长石，半自形-自形，板状，0.4～1.5 mm，表面粗糙，可见卡氏双晶。石英，无色，他形，粒状，0.2～0.5 mm。

2.3　测试方法

岩矿石主微量元素测试：首先，将进行主微量元素测试的样品碎至 200 目，碎样时保证样品不受污染。主量元素的测定依据与方法为 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法，X 射线荧光光谱法测定主量元素，测试仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪；微量元素和稀土元素测试方法为 DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）方法通则，测试仪器为 Finnigan MAT 制造，HR-ICP-MS(Element I)。碎样单位为廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司，主微量元素测试单位为核工业地质研究院分析测试研究中心。

锆石挑选及测年：将岩石样品准备好，经粉碎、细磨、筛选、淘洗、磁选和重液分离，将锆石分别从取自研究区域的岩石样品中分离出来，在双目镜下尽量挑选无包裹体、无裂纹、透明度好的单颗粒锆石作为测试样品。将测试样品固定于环氧树脂中制靶，待固结后将锆石颗粒抛磨至其厚度的一半左右，使锆石内部充分暴露，然后进行锆石的透射、CL 显微图像及 LA-ICP-MS 方法测定锆石的 U-Pb 同位素年龄。详细分析步骤和数据处理方法参见相关文献（Horn et al.，2000；Ballard et al.，2001；Kosler et al.，2002；袁洪林等，2003）。激光剥蚀等离子体质谱（LA-ICP-MS）锆石微区原位单点定年是在 Agilent7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102ArF 准分子激光器（工作物质 ArF，波长 193 nm），以及 MicroLas 公司的 GeoLas200M 光学系统的联机上进行测试的。实验室中采用 He 作为剥蚀物质的载气，用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质剥蚀，数据采集选用一个质量峰一个点的跳峰方式，每完成 4～5 个测点的样品测定加测标样一次（李向民等，2009），测试工作按照 Andersen 的方法（Andersen，2002），用 LA-ICP-MS Common Lead Correction(ver3.15)对其进行了普通铅校正，所有样品均采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄，年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver3.0)完成。锆石挑选工作由廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司完成，LA-ICP-MS 锆石测年由西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

锆石微量元素测试：详细分析流程见有关文献（Gao et al.，2002）。实验时 ArF 激光束工作波长为 193 nm，束斑直径为 40 μm，频率为 10 Hz，激光束能量为 140 mJ。以锆石的 SiO_2 含量作为内标，以 NIST610 为外标，数据处理采用 GLITTER 程序。测试单位为西北大学大陆动力学国家重点实验室。

2.4　分析结果

主微量元素含量：更乃似斑状二长花岗岩（3 件）中主量元素、微量元素和稀土元素的测试结果见表 1，更乃似斑状二长花岗岩中锆石 29 个测点的微量元素及稀土元素含量见表 2、表 3，岩矿石（86 件）中个别元素的含量见表 4。

锆石特征：锆石总体看来结晶较好，边缘也比较规则，多数无色透明，呈柱状，长轴最小值约为 90 μm，长宽比介于 1∶1～5∶1，锆石的振荡环带较为明显。柱状形态与环带结构显示其岩浆成因特征（李长民，2009；吕立娜等，2011）。更乃似斑状二长花岗岩（GN-11-1-4）中锆石的阴极发光图像见图 2。

测年结果：更乃似斑状二长花岗岩中单颗粒锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 5，单个数据点的误差均为 1σ。对 GN-11-1-4 样品中的锆石，进行了 29 个测点的同位素测试，拟合谐和年龄时排除 7 个点：04、06、11、17、20、21、28（由于其位于靠近核部或核部与环带之间，而没有严格位于锆石韵律环带上，其年龄不能代表更乃似斑状二长花岗岩的成岩年龄），剩余 22 个测点的 U 含量为 73.44×10^{-6}～2578.28×10^{-6}，Th 含量为 83.19×10^{-6}～3204.83×10^{-6}，Th/U值介于0.50～2.17，为岩浆成因锆石（Rubatto，

表 1 更乃似斑状二长花岗岩主量元素(%)、微量元素(×10⁻⁶)和稀土元素的含量(×10⁻⁶)

Table 1 Analyses of major elements (%), trace elements (×10⁻⁶) and rare earth elements (×10⁻⁶) of the Gengnai porphyritic monzonitic granite

样品编号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	烧失量	FeO
GN-11-1-6	75.83	12.70	1.00	0.20	0.86	3.10	5.37	0.03	0.13	0.03	0.76	0.55
GN-11-3-10(2)	72.36	13.92	1.76	0.63	1.38	3.46	4.78	0.04	0.29	0.10	1.13	0.80
GN-11-5-2	72.96	13.79	1.65	0.54	1.50	3.15	4.89	0.04	0.28	0.10	1.08	0.70
样品编号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr
GN-11-1-6	19.00	4.29	3.79	14.30	6.20	1.24	1.52	30.30	34.80	16.40	327.00	105.00
GN-11-3-10(2)	51.60	7.16	5.63	26.50	14.30	2.60	8.78	9.13	42.80	18.60	401.00	207.00
GN-11-5-2	75.40	5.16	6.92	18.40	9.04	1.93	2.73	6.64	33.80	18.20	280.00	152.00
样品编号	Nb	Mo	Cd	In	Sb	Cs	Ba	Ta	W	Re	Tl	Pb
GN-11-1-6	13.80	0.65	0.44	0.17	0.23	12.40	77.10	1.39	3.03	未检出	1.45	46.80
GN-11-3-10(2)	14.90	0.45	0.23	0.06	0.24	20.20	316.00	1.22	2.55	0.004	1.80	36.50
GN-11-5-2	19.80	0.43	0.13	0.11	0.18	15.80	166.00	2.09	4.91	0.002	1.53	41.20
样品编号	Bi	Th	U	Zr	Hf	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
GN-11-1-6	6.58	33.20	5.35	65.10	2.77	30.00	46.20	4.21	12.20	1.59	0.31	1.38
GN-11-3-10(2)	4.60	32.40	6.94	68.50	2.10	46.40	80.40	8.19	26.90	3.95	0.83	3.04
GN-11-5-2	10.90	42.10	9.71	97.50	3.56	59.80	109.00	11.60	37.40	5.85	0.85	4.04
样品编号	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE
GN-11-1-6	0.21	1.15	0.24	0.78	0.15	1.37	0.21	8.03	108.03	94.51	13.52	6.99
GN-11-3-10(2)	0.42	2.17	0.33	0.92	0.15	1.28	0.20	11.70	186.89	166.67	20.22	8.25
GN-11-5-2	0.75	3.64	0.52	2.07	0.34	1.90	0.39	20.60	258.74	224.50	34.24	6.56

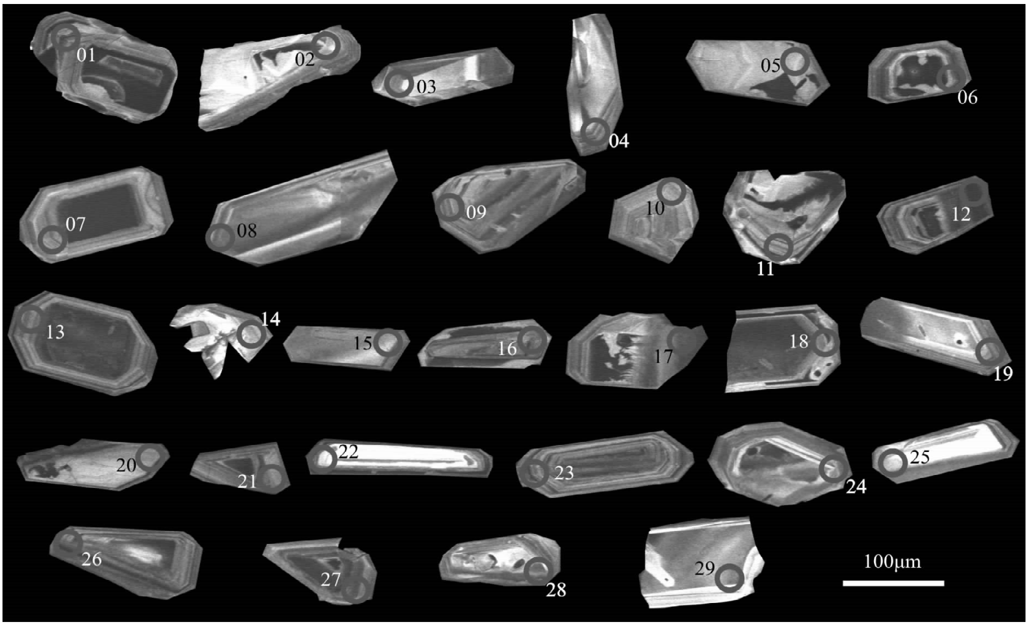

图 2 更乃似斑状二长花岗岩(GN-11-1-4)中锆石的阴极发光图像

Fig. 2 Cathodoluminescence images of zircons from the sample (GN-11-1-4) of Gengnai porphyritic monzonitic granite

2002;吴元保等,2004)。同位素比值校正后获得的$^{206}Pb/^{238}U$年龄为67～89 Ma,年龄数据除少数在两端分布外,多数集中在77 Ma左右(图3),在U-Pb一致曲线上均接近谐和线,给出的加权平均年龄为78.7±1.7 Ma(MSWD＝9.0,95%置信度)(图3),为岩浆的结晶年龄,即似斑状二长花岗岩的成岩年龄为78.7±1.7 Ma。

3 地球化学特征

3.1 更乃岩体地球化学特征

3.1.1 主量元素

从主量元素、微量元素和稀土元素分析结果(表

表 2　更乃似斑状二长花岗岩中锆石各测点的微量元素含量($\times10^{-6}$)

Table 2　Analyses of trace elements ($\times10^{-6}$) of zircons in Gengnai porphyritic monzonitic granite

测点点号	Th	Ta	Nb	Ce	P	Hf	Sm	Ti	Y	Yb
GN-11-1-4-01	432.55	2.40	7.55	48.57	331.61	9691.94	2.49	6.76	679.29	328.93
GN-11-1-4-02	953.13	1.68	6.59	161.75	944.03	7196.13	14.64	5.45	1765.66	523.69
GN-11-1-4-03	299.85	1.05	2.72	46.81	342.59	7776.68	7.24	7.05	1167.75	344.23
GN-11-1-4-04	418.95	0.84	2.91	107.61	640.75	7789.43	14.03	14.96	1342.11	400.30
GN-11-1-4-05	1119.08	2.76	9.60	88.54	584.55	8534.83	9.70	7.85	2187.85	690.09
GN-11-1-4-06	835.78	1.80	5.77	72.48	582.74	10552.41	3.44	5.73	737.55	311.33
GN-11-1-4-07	756.00	1.92	6.39	45.27	134.66	9535.84	2.10	2.87	718.31	287.63
GN-11-1-4-08	294.11	1.46	4.60	62.98	542.79	7771.20	5.74	11.31	1233.17	425.69
GN-11-1-4-09	435.78	1.37	4.35	61.09	389.79	9271.24	3.29	3.62	666.12	261.29
GN-11-1-4-10	205.71	1.14	3.33	25.49	105.90	10605.40	0.89	2.44	442.21	226.26
GN-11-1-4-11	348.50	1.02	3.22	22.20	92.50	9368.50	0.72	2.39	343.18	162.07
GN-11-1-4-12	2676.98	6.20	24.47	122.16	347.73	9042.51	7.47	6.36	2118.01	714.08
GN-11-1-4-13	667.20	2.08	7.25	46.42	216.70	9541.16	2.44	8.11	775.24	314.78
GN-11-1-4-14	302.71	1.00	4.82	36.45	342.75	10213.39	2.42	12.47	554.83	268.05
GN-11-1-4-15	2180.91	3.05	14.60	123.64	252.95	7928.47	7.46	12.07	1562.65	520.81
GN-11-1-4-16	484.47	1.31	4.70	43.13	127.38	9366.19	1.91	6.63	601.80	261.21
GN-11-1-4-17	317.62	1.46	8.60	38.95	1159.26	7703.69	3.58	31.54	580.40	195.24
GN-11-1-4-18	402.53	1.35	3.86	27.54	110.01	9610.83	1.08	2.67	503.11	232.89
GN-11-1-4-19	188.84	1.07	3.06	33.99	184.57	8513.07	3.85	9.94	827.87	314.20
GN-11-1-4-20	816.41	1.32	8.49	75.51	337.06	6731.30	7.17	23.57	1146.38	367.53
GN-11-1-4-21	2609.84	4.14	20.73	197.79	466.19	7699.82	11.69	11.58	2464.69	782.12
GN-11-1-4-22	177.12	0.81	2.52	33.71	283.63	6772.31	5.06	14.42	977.59	339.39
GN-11-1-4-23	391.84	1.76	4.68	31.33	136.96	9286.04	1.28	2.33	531.06	240.85
GN-11-1-4-24	371.12	1.03	3.68	72.16	541.91	6281.78	10.51	13.06	1593.58	505.41
GN-11-1-4-25	83.19	0.37	1.10	63.33	1762.80	6191.09	7.24	12.19	564.74	177.40
GN-11-1-4-26	3204.83	4.96	24.35	391.37	6734.33	7686.39	27.88	24.87	3508.85	981.48
GN-11-1-4-27	966.59	3.21	12.88	540.67	7334.01	8933.73	34.61	5.65	1560.69	481.03
GN-11-1-4-28	318.69	1.04	3.09	42.40	183.73	8554.04	3.36	6.95	665.96	255.08
GN-11-1-4-29	329.51	0.96	3.08	44.78	221.57	7904.71	5.69	6.38	1072.34	373.24

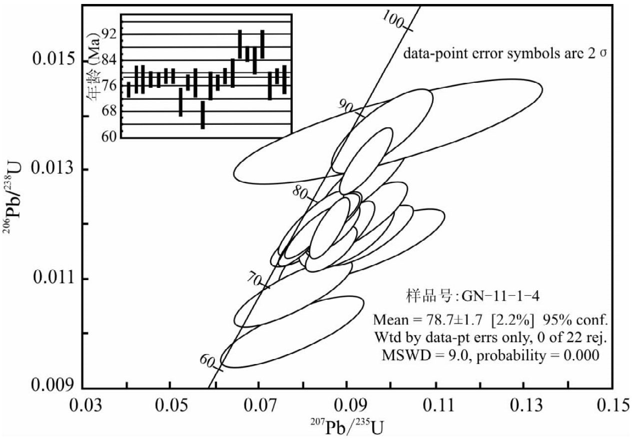

图 3　更乃似斑状二长花岗岩(GN-11-1-4)中锆石 U-Pb 年龄谐和图与加权平均图

Fig. 3　U-Pb concordia diagram and histogram of zircons from Gengnai porphyritic monzonitic granite (sample GN-11-1-4)

1)中可看出，更乃岩体似斑状二长花岗岩(GN-11-1-6、GN-11-3-10(2)、GN-11-5-2)样品的 SiO_2 含量介于 72.36%～75.83%之间，为酸性岩。Al_2O_3 含量为 12.70% ～ 13.92%，MgO 含量为 0.20% ～ 0.63%，CaO 含量为 0.86%～1.50%，K_2O 含量为 4.78%～5.37%，Na_2O 含量为 3.10%～3.46%，K_2O/Na_2O 为 1.38～1.73，显示富钾特征。铝过饱和指数(A/CNK)变化于 1.02～1.05 之间，在 A/NK-A/CNK 图解(图 4a)中主要为过铝质系列，具 S 型花岗岩特征。里特曼指数(σ)为 2.15～2.31，小于 3.3，属钙碱性岩石系列，在 SiO_2-K_2O 图解投图也主要落在了高钾钙碱性系列区域(图 4b)。

3.1.2　微量和稀土元素

从微量元素蛛网图(图 5a)中可以看出，更乃似斑状二长花岗岩富集大离子亲石元素 Rb、Th，亏损 Sr、Ba、P、Ti 等元素。“峰”和“谷”区别清晰，属于典型的低 Ba-Sr 花岗岩。从稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图 5b)可以看出，更乃似斑状二长花岗岩的稀土元素配分曲线为右倾型，重稀土元素部分

表 3 更乃似斑状二长花岗岩中锆石各测点的稀土元素含量($\times10^{-6}$)

Table 3 Analyses of rare earth elements ($\times10^{-6}$) of zircons in the Gengnai porphyritic monzonitic granite

样品测点点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
GN-11-1-4-01	6.91	48.57	1.86	7.94	2.49	0.44	8.32	3.17	43.68	19.47	106.12
GN-11-1-4-02	16.71	161.75	4.88	25.69	14.64	3.86	50.28	15.26	165.18	59.00	256.92
GN-11-1-4-03	0.46	46.81	0.30	4.45	7.24	2.00	29.63	9.72	107.04	38.38	167.15
GN-11-1-4-04	12.53	107.61	5.89	31.84	14.03	3.68	42.74	12.32	129.17	45.08	191.61
GN-11-1-4-05	0.33	88.54	0.42	5.50	9.70	2.04	46.20	15.95	189.49	70.85	318.62
GN-11-1-4-06	9.70	72.48	2.20	9.18	3.44	0.78	12.84	4.46	54.87	22.14	110.23
GN-11-1-4-07	0.03	45.27	0.04	0.76	2.10	0.53	11.30	4.20	53.44	21.40	107.09
GN-11-1-4-08	4.70	62.98	1.36	7.77	5.74	1.65	24.06	8.23	101.03	39.40	185.48
GN-11-1-4-09	5.16	61.09	1.08	5.16	3.29	0.84	12.84	4.46	53.33	20.97	101.65
GN-11-1-4-10	0.45	25.49	0.13	0.90	0.89	0.27	5.59	2.19	28.43	12.72	68.62
GN-11-1-4-11	0.04	22.20	0.04	0.35	0.72	0.26	4.52	1.61	21.22	9.57	52.13
GN-11-1-4-12	5.90	122.16	0.74	4.51	7.47	1.41	40.78	14.48	174.85	67.29	312.32
GN-11-1-4-13	1.30	46.42	0.46	2.80	2.44	0.55	12.10	4.52	56.63	23.56	115.67
GN-11-1-4-14	3.38	36.45	1.10	4.08	2.42	0.53	7.74	2.88	39.77	15.82	84.28
GN-11-1-4-15	2.02	123.64	0.76	5.73	7.46	1.67	31.76	11.06	129.11	49.35	225.05
GN-11-1-4-16	0.81	43.13	0.18	1.33	1.91	0.59	9.56	3.49	42.89	17.83	90.10
GN-11-1-4-17	3.52	38.95	1.48	6.79	3.58	0.72	11.60	3.80	45.15	17.52	82.14
GN-11-1-4-18	0.06	27.54	0.04	0.71	1.08	0.35	7.33	2.58	32.66	14.20	76.77
GN-11-1-4-19	0.07	33.99	0.19	2.47	3.85	1.24	16.16	5.76	67.22	26.85	127.62
GN-11-1-4-20	3.19	75.51	1.08	6.97	7.17	1.86	27.27	8.95	100.68	37.14	165.56
GN-11-1-4-21	3.54	197.79	1.15	8.39	11.69	2.81	55.01	18.46	216.18	81.04	362.05
GN-11-1-4-22	0.10	33.71	0.19	2.93	5.06	1.57	19.94	6.79	81.18	31.74	148.52
GN-11-1-4-23	0.09	31.33	0.05	0.73	1.28	0.34	7.13	2.81	36.43	15.68	81.28
GN-11-1-4-24	1.55	72.16	1.01	9.48	10.51	3.43	41.81	13.08	147.30	52.64	231.41
GN-11-1-4-25	23.53	63.33	5.82	26.21	7.24	1.56	17.55	5.12	53.89	19.27	83.43
GN-11-1-4-26	66.23	391.37	16.20	69.62	27.88	5.91	93.52	30.33	334.40	118.02	499.31
GN-11-1-4-27	192.60	540.67	48.44	182.76	34.61	2.78	49.72	12.93	136.23	47.44	211.89
GN-11-1-4-28	0.36	42.40	0.19	2.74	3.36	1.06	13.55	4.71	54.31	20.59	97.22
GN-11-1-4-29	0.04	44.78	0.20	3.58	5.69	1.59	24.38	8.07	92.12	34.36	157.59

样品测点点号	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	LaN/YbN	δEu	δCe
GN-11-1-4-01	27.65	328.93	70.72	679.29	1355.56	68.21	1287.35	0.05	0.02	0.08	11.08
GN-11-1-4-02	53.90	523.69	94.72	1765.66	3212.14	227.53	2984.61	0.08	0.02	0.12	14.98
GN-11-1-4-03	35.41	344.23	61.42	1167.75	2021.98	61.25	1960.73	0.03	0.00	0.11	124.83
GN-11-1-4-04	40.67	400.30	72.38	1342.11	2451.96	175.58	2276.38	0.08	0.02	0.13	11.68
GN-11-1-4-05	69.45	690.09	124.67	2187.85	3819.70	106.53	3713.17	0.03	0.00	0.07	235.48
GN-11-1-4-06	27.23	311.33	64.48	737.55	1442.91	97.78	1345.13	0.07	0.02	0.10	12.18
GN-11-1-4-07	25.87	287.63	59.59	718.31	1337.56	48.73	1288.83	0.04	0.00	0.08	1293.43
GN-11-1-4-08	41.52	425.69	78.48	1233.17	2221.26	84.20	2137.06	0.04	0.01	0.11	20.77
GN-11-1-4-09	24.16	261.29	51.16	666.12	1272.60	76.62	1195.98	0.06	0.01	0.10	19.58
GN-11-1-4-10	18.37	226.26	50.01	442.21	882.53	28.13	854.40	0.03	0.00	0.08	87.29
GN-11-1-4-11	13.74	162.07	37.76	343.18	669.41	23.61	645.80	0.04	0.00	0.10	555.00
GN-11-1-4-12	70.02	714.08	132.46	2118.01	3786.48	142.19	3644.29	0.04	0.01	0.06	36.78
GN-11-1-4-13	28.76	314.78	65.24	775.24	1450.47	53.97	1396.50	0.04	0.00	0.08	52.72
GN-11-1-4-14	22.24	268.05	58.87	554.83	1102.44	47.96	1054.48	0.05	0.01	0.10	16.27
GN-11-1-4-15	51.64	520.81	99.62	1562.65	2822.33	141.28	2681.05	0.05	0.00	0.09	88.95
GN-11-1-4-16	22.46	261.21	55.16	601.80	1152.45	47.95	1104.50	0.04	0.00	0.10	87.40
GN-11-1-4-17	18.63	195.24	36.68	580.40	1046.20	55.04	991.16	0.06	0.01	0.09	15.58
GN-11-1-4-18	19.29	232.89	50.27	503.11	968.88	29.78	939.10	0.03	0.00	0.08	556.36
GN-11-1-4-19	29.39	314.20	59.96	827.87	1516.84	41.81	1475.03	0.03	0.00	0.12	265.55
GN-11-1-4-20	36.73	367.53	67.27	1146.38	2053.29	95.78	1957.51	0.05	0.01	0.11	35.38
GN-11-1-4-21	79.18	782.12	140.09	2464.69	4424.19	225.37	4198.82	0.05	0.00	0.08	84.40
GN-11-1-4-22	33.44	339.39	63.09	977.59	1745.25	43.57	1701.68	0.03	0.00	0.13	228.54
GN-11-1-4-23	20.73	240.85	49.60	531.06	1019.39	33.82	985.57	0.03	0.00	0.08	438.18
GN-11-1-4-24	50.70	505.41	89.30	1593.58	2823.37	98.14	2725.23	0.04	0.00	0.13	56.44
GN-11-1-4-25	17.66	177.40	31.45	564.74	1098.20	127.69	970.51	0.13	0.10	0.13	4.32
GN-11-1-4-26	104.42	981.48	165.48	3508.85	6413.02	577.21	5835.81	0.10	0.05	0.10	9.50
GN-11-1-4-27	47.02	481.03	86.06	1560.69	3634.87	1001.86	2633.01	0.38	0.29	0.07	4.49
GN-11-1-4-28	23.45	255.08	48.47	665.96	1233.45	50.11	1183.34	0.04	0.00	0.13	154.74
GN-11-1-4-29	36.29	373.24	70.07	1072.34	1924.34	55.88	1868.46	0.03	0.00	0.11	373.17

表 4　更乃岩矿石中个别元素的含量

Table 4　Analyses of several elements in the Gengnai rocks and ores

序号	样号	Fe (%)	Cu (×10⁻⁶)	Sn	Zn	Bi	In
1	GN-1	2.61	359.00		58.30	0.37	0.06
2	GN-2	2.59	18.10		51.50	0.77	0.04
3	GN-4	3.66	29.00		728.00	5.38	21.90
4	GN-5	3.37	293.00		294.00	8.91	1.42
5	GN-6	3.46	197.00		188.00	12.70	1.49
6	GN-7	1.78	9.52		46.90	0.16	0.04
7	GN-8	1.07	19.30		42.80	0.89	0.03
8	GN-9	60.67	17365.00		775.00	304.00	19.50
9	GN-10	2.75	21.10		64.90	0.50	0.08
10	GN-11	19.67	274.00		407.00	9.20	9.81
11	GN-12	0.83	13.30		60.00	0.52	0.16
12	GN-13	3.20	48.90		372.00	12.20	0.05
13	GN-14	1.42	50.60		204.00	0.40	0.04
14	GN-15	2.45	61.50		176.00	7.33	0.33
15	GN-16	7.65	21.20		2763.00	67.70	3.83
16	GN-17	19.57	53.6		1666.00	31.80	12.40
17	GN-18	14.30	7.55		67.30	1.75	4.61
18	GN-19	0.96	8.46		63.00	0.21	0.05
19	GN-20	19.61	25.60		1273.00	3.65	4.22
20	GN-21	1.62	231.00		498.00	0.98	0.03
21	GN-22	1.54	16.60		47.90	0.83	0.07
22	GN-23	4.28	17.20		195.00	80.50	0.42
23	GN-24	2.33	517.00		394.00	11.30	0.06
24	GN-25	2.40	19.20		46.30	0.81	0.15
25	GN-26	18.14	24.70		895.00	16.10	6.87
26	GN-27	0.39	60.00		55.80	0.64	0.39
27	GN-28	0.26	2.66		36.50	0.06	0.01
28	GN-29	0.31	4.81		39.90	0.13	0.03
29	GN-30	0.31	3.72		63.20	0.86	0.01
30	GN-31	0.27	5.45		55.30	0.23	0.02
31	GN-32	0.25	10.50		33.40	0.14	0.03
32	GN-33	0.29	8.64		70.00	1.79	0.07
33	GN-34	68.80	1846.00		1470.00	34.70	25.5
34	GN-35	45.41	1684.00		5489.00	1317.00	98.80
35	GN-36	0.27	5.43		71.30	1.05	0.08
36	GN-37	9.78	840.00		1499.00	466.00	144.00
37	GN-38	50.39	258.00		1666.00	125.00	74.50
38	GN-39	10.44	908.00		5463.00	465.00	5.33
39	GN-40	6.43	237.00		4667.00	135.00	6.54
40	GN-41	9.19	65.20		2836.00	196.00	2.00
41	GN-42	11.49	631.00		4912.00	150.00	3.15
42	GN-09-1 (1)	2.85	36.40	4.50	471.00	1.33	0.05
43	GN-09-1 (2)	3.24	12.40	4.19	1131.00	6.82	0.03
44	GN-09-3 (1)	1.40	8.11	8.40	72.10	0.49	0.05
45	GN-09-3 (2)	1.42	5.66	9.89	57.60	2.49	0.10
46	GN-09-3 (3)	1.27	8.70	9.57	24.60	0.29	0.06
47	GN-09-4	15.36	14.60	3.43	106.00	35.40	7.92
48	GN-09-7	37.50	10.30	2.55	154.00	27.50	5.61
49	GN-09-9	14.50	239.00	84.70	194.00	45.90	13.30
50	GN-09-12	40.48	622.00	2.62	36.60	31.10	10.40
51	GN-09-13	7.89	118.00	5.18	28785.00	16.00	1.46
52	GN-09-14	11.57	55.60	4.66	50411.00	57.50	2.50
53	GN-09-15	8.44	31.60	8.23	192.00	0.77	0.12
54	GN-09-16	4.33	9.83	6.67	59.70	0.45	0.10
55	GN-09-17	4.42	12.3	7.75	139.00	0.49	0.10
56	GN-09-18	16.86	9.57	297.00	401.00	1.33	6.04
57	GN-09-20	17.06	7.07	272.00	980.00	5.13	11.70
58	GN-09-22	17.10	14.90	123.00	2489.00	8.03	16.10
59	GN-09-27	57.97	517.00	1188.00	1818.00	538.00	65.30
60	GN-09-28	22.38	3095.00	2509.00	2913.00	274.00	40.40
61	GN-09-30	7.42	55.00	33.20	7238.00	24.00	2.62
62	GN-09-31	7.26	58.30	33.10	6824.00	168.00	2.62
63	GN-09-33	8.23	55.70	56.30	10193.00	170.00	3.08
64	GN-09-34	2.75	8.35	4.23	561.00	1.22	0.10
65	GN-09-36	3.17	9.40	4.54	431.00	0.39	0.05
66	GN-09-39	2.14	5.64	9.55	72.10	0.26	0.09
67	GN-09-40	2.17	3.22	8.31	39.90	0.19	0.06
68	GN-09-44	7.04	1828.00	1.82	83967.00	22.50	27.80
69	GN-09-45	4.48	9329.00	0.70	74136.00	73.20	11.00
70	GN-09-46	4.89	486.00	1.41	12683.00	2.20	1.20
71	GN-09-47	1.91	20.90	2.09	721.00	2.46	0.04
72	GN-09-49	4.05	28.10	0.61	17520.00	37.20	17.70
73	GN-09-50	1.36	45.50	1.00	186998.00	7.20	52.60
74	GN-09-51	4.21	33.60	0.95	72753.00	358.00	4.32
75	GN-09-53 (1)	4.10	6.79	7.00	3259.00	5.35	0.17
76	GN-09-53 (2)	4.61	7.00	6.22	4793.00	8.05	0.29
77	GN-09-53 (3)	4.98	19.40	4.27	194.00	1.12	0.16
78	GN-09-54 (1)	5.37	255.00	0.97	1328.00	134.00	7.55
79	GN-09-54 (2)	4.80	14.80	5.06	8599.00	14.30	0.70
80	GN-09-55 (1)	26.73	122.00	1.41	831.00	734.00	23.00
81	GN-09-55 (2)	50.62	373.00	2.44	2567.00	5538.00	60.70
82	GN-09-55 (3)	36.43	868.00	6.26	3023.00	115.00	30.80
83	GN-09-56	31.90	784.00	26.10	28668.00	37.20	125.00
84	GN-09-57 (1)	0.31	25.00	0.53	66.50	1.99	0.13
85	GN-09-57 (2)	0.36	13.10	1.11	185.00	0.96	0.07
86	GN-09-57 (3)	0.36	6.26	0.54	134.00	0.64	0.03

的曲线形态较为平缓。$\sum REE = 108.03 \times 10^{-6}$ ～

表 5　更乃似斑状二长花岗岩(GN-11-1-4)中单颗粒锆石 U-Pb 同位素测定结果

Table 5　Dating results of U-Pb isotopes for single zircon in Gengnai porphyritic monzonitic granite (sample GN-11-1-4)

样号	^{204}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb	^{232}Th	^{238}U	同位素比值								年龄(Ma)								Th/U
	($\times10^{-6}$)						$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	1σ	
GN-11-1-4-01	1.38	39.86	2.81	3.94	432.55	812.08	0.04801	0.00281	0.07784	0.00433	0.01176	0.00021	0.00373	0.00005	100	131	76	4	75	1	75	1	0.53
GN-11-1-4-02	<1.30	25.26	1.379	6.49	953.13	510.68	0.04955	0.00297	0.08264	0.00439	0.01210	0.00024	0.00349	0.00007	174	86	81	4	78	2	70	1	1.87
GN-11-1-4-03	<0.86	14.02	0.931	2.47	299.85	277.82	0.04810	0.00390	0.08065	0.00635	0.01216	0.00024	0.00386	0.00006	104	182	79	6	78	2	78	1	1.08
GN-11-1-4-05	1	58.86	3.25	8.84	1119.08	1180.39	0.04605	0.00210	0.07708	0.00326	0.01214	0.00021	0.00391	0.00006		98	75	3	78	1	79	1	0.95
GN-11-1-4-07	<0.92	48.15	2.55	5.76	756	963.84	0.04795	0.00187	0.08092	0.00238	0.01224	0.00021	0.00390	0.00007	97	38	79	2	78	1	79	1	0.78
GN-11-1-4-08	<0.93	14.37	0.824	2.38	294.11	283.96	0.04605	0.00287	0.07816	0.00465	0.01231	0.00023	0.00395	0.00007		136	76	4	79	1	80	1	1.04
GN-11-1-4-09	<0.94	23.27	1.239	3.29	435.78	464.69	0.04810	0.00225	0.08143	0.00315	0.01228	0.00022	0.00386	0.00008	104	57	79	3	79	1	78	2	0.94
GN-11-1-4-10	1.91	20.45	2.53	3.13	205.71	413.09	0.04605	0.00448	0.07068	0.00671	0.01113	0.00024	0.00359	0.00021		203	69	6	71	2	72	4	0.50
GN-11-1-4-12	<1.09	126.98	7.97	20.64	2676.98	2578.28	0.05131	0.00356	0.08496	0.00567	0.01201	0.00023	0.00378	0.00005	255	160	83	5	77	1	76	1	1.04
GN-11-1-4-13	<1.02	48.42	3.27	5.4	667.2	980.24	0.05282	0.00418	0.08752	0.00669	0.01202	0.00025	0.00377	0.00006	321	182	85	6	77	2	76	1	0.68
GN-11-1-4-14	<1.82	24.32	2.61	3.42	302.71	535.9	0.04903	0.00576	0.07083	0.00814	0.01048	0.00025	0.00331	0.00012	149	251	69	8	67	2	67	2	0.57
GN-11-1-4-15	1.58	67.37	4.91	16.76	2180.91	1369.7	0.05509	0.00574	0.09061	0.00922	0.01193	0.00026	0.00372	0.00005	416	238	88	9	76	2	75	1	1.59
GN-11-1-4-16	<0.93	37.33	2.43	4.2	484.47	748.32	0.04686	0.00283	0.07812	0.00450	0.01209	0.00022	0.00385	0.00007	42	133	76	4	77	1	78	1	0.65
GN-11-1-4-18	<1.88	40.1	2.07	3.21	402.53	797.45	0.04633	0.00237	0.07908	0.00346	0.01238	0.00023	0.00407	0.00010	15	59	77	3	79	1	82	2	0.51
GN-11-1-4-19	<0.97	12.66	0.743	1.466	188.84	251.03	0.05256	0.00328	0.09002	0.00504	0.01242	0.00025	0.00396	0.00011	310	91	88	5	80	2	80	2	0.75
GN-11-1-4-22	<1.04	9.14	0.511	1.57	177.12	162.5	0.04997	0.00332	0.09558	0.00577	0.01387	0.00029	0.00452	0.00011	194	100	93	5	89	2	91	2	1.09
GN-11-1-4-23	<0.98	37.44	2.07	3.8	391.84	691.1	0.04935	0.00203	0.09094	0.00294	0.01336	0.00023	0.00494	0.00009	164	44	88	3	86	1	100	2	0.57
GN-11-1-4-24	<0.96	13.33	0.754	3.18	371.12	250.52	0.05048	0.00285	0.09138	0.00454	0.01313	0.00025	0.00437	0.00009	217	80	89	4	84	2	88	2	1.48
GN-11-1-4-25	1	4.96	1.011	1.544	83.19	73.44	0.05060	0.00917	0.09693	0.01738	0.01389	0.00037	0.00438	0.00015	222	343	94	16	89	2	88	3	1.13
GN-11-1-4-26	1.71	72.01	5.69	24.15	3204.83	1476.59	0.59130	0.00622	0.09681	0.00997	0.01188	0.00026	0.00367	0.00005	572	238	94	9	76	2	74	1	2.17
GN-11-1-4-27	1.55	50.61	3.06	7.7	966.59	1013.59	0.04855	0.00331	0.08206	0.00538	0.01226	0.00023	0.00388	0.00005	126	154	80	5	79	1	78	1	0.95
GN-11-1-4-29	<1.09	16.29	0.861	2.56	329.51	329.09	0.04698	0.00279	0.07934	0.00421	0.01225	0.00024	0.00396	0.00009	48	79	78	4	78	2	80	2	1.00

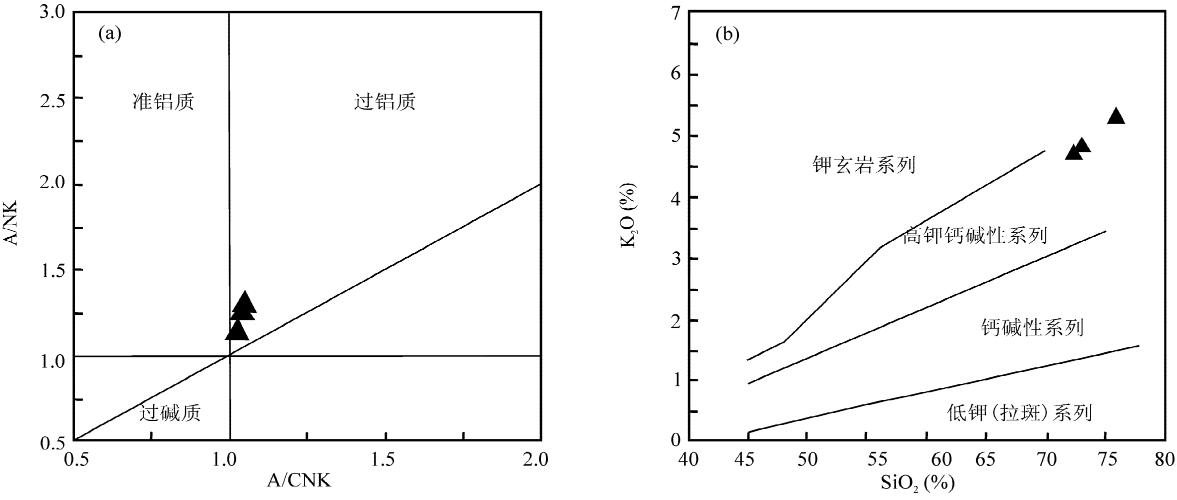

图 4　更乃似斑状二长花岗岩 A/NK-A/CNK(a)与K_2O-SiO_2(b)图解

Fig. 4　A/NK-A/CNK (a) and K_2O-SiO_2 (b) diagrams for Gengnai porphyritic monzonitic granite

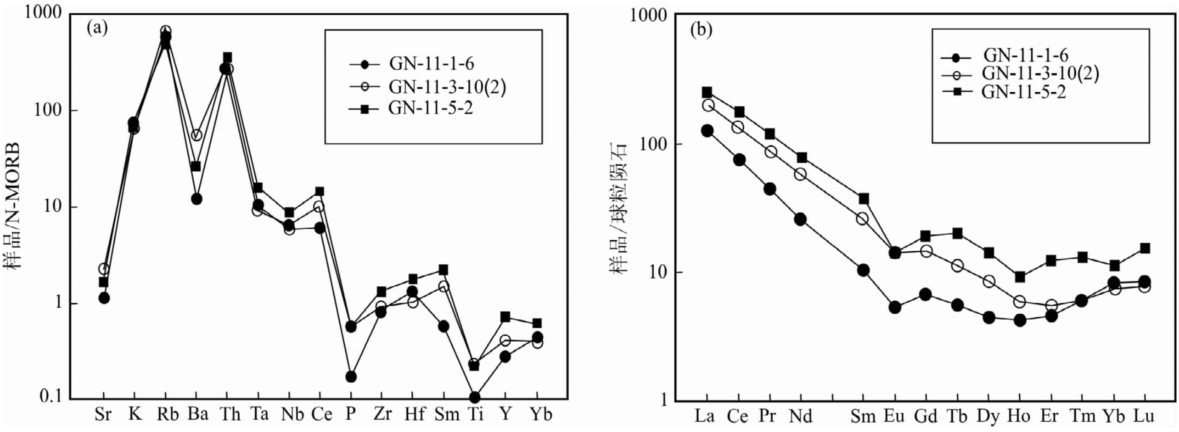

图 5　更乃似斑状二长花岗岩的微量元素蛛网图(a)与稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(b)

Fig. 5　Spider diagrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Gengnai porphyritic monzonitic granite

258.74×10^{-6}，平均值为 184.55×10^{-6}，稀土元素总量偏低。LREE/HREE 为 6.56～8.25，$(La/Yb)_N$ 为 15.71～26.00，轻重稀土元素高度分异。具有中等的 Eu 负异常(δEu＝0.17～0.24)。

3.2　锆石地球化学特征

更乃似斑状二长花岗岩(样号 GN-11-1-4)中锆石的微量元素球粒陨石标准化蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化分布型式图分别见图 6a、图 6b。从图 6a 中可以看出，更乃似斑状二长花岗岩中的锆石强烈富集 U、Th、Hf，明显亏损 Ti，Ta、Nb 既不亏损也不富集。29 个锆石的 Th/U 的范围为 0.50～1.87，显示岩浆锆石的特征(李长民，2009)。从图 6b 中可以看出，其锆石稀土元素配分曲线为左倾形。∑REE＝669.41×10^{-6}～6413.02×10^{-6}，具有非常高的稀土元素总量。LREE/HREE 为 0.03～0.38，$(La/Yb)_N$ 为 0.00～0.29，轻重稀土元素明显分异。δCe＝4.32～1293.43，δEu＝0.06～0.13，具有比较高 Ce 正异常和中等的 Eu 负异常。上述特征进一步证明更乃似斑状二长花岗岩中锆石为岩浆锆石。

3.3　矿化特征

由更乃矿床 86 件岩矿石中个别元素的含量(表 4)，得到铁含量的变化范围为 0.25%～68.80%，平均值为 10.86%；铜含量的变化范围为 2.66×10^{-6}～17365.00×10^{-6}，平均值为 529.78×10^{-6}；锡含量的变化范围为 0.53×10^{-6}～2509.00×10^{-6}，平均值为 106.02×10^{-6}；锌含量的变化范围为 24.60×10^{-6}～186998.00×10^{-6}，平均值为 7651.44×10^{-6}；铋含量的变化范围为 0.06×10^{-6}～5538.00×10^{-6}，平均值为 139.34×10^{-6}；铟含量的变化范围为 0.01×10^{-6}～144.88×10^{-6}，平均值为 11.64

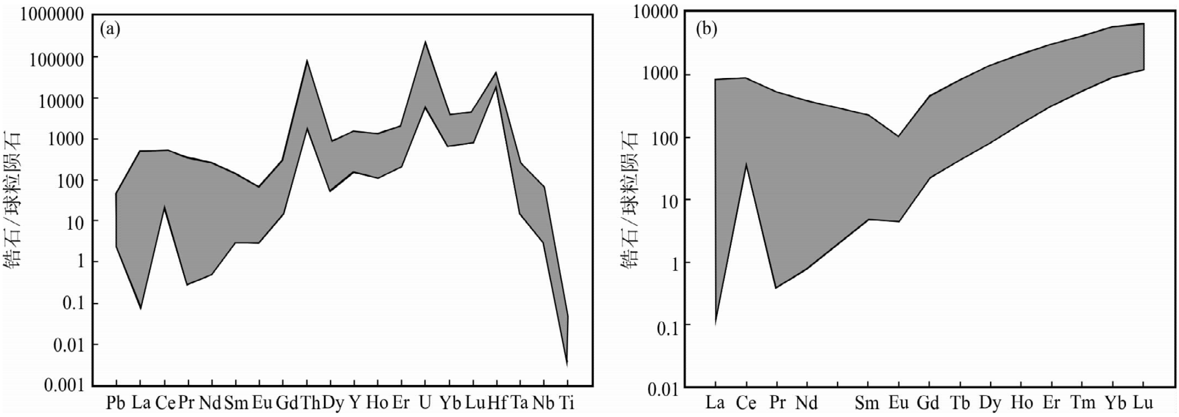

图 6 更乃似斑状二长花岗岩中锆石的微量元素蛛网图(a)与稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(b)

Fig. 6 Spider diagrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of zircon in Gengnai porphyritic monzonitic granite

$\times 10^{-6}$。

对岩矿石中的 11 件铁矿石进行了个别元素含量的统计,得到铁含量的变化范围为 26.73%～68.80%,平均值为 46.08%;铜含量的变化范围为 $2.66\times 10^{-6}\sim 17365.00\times 10^{-6}$,平均值为 529.78×10^{-6};铋含量的变化范围为 $27.50\times 10^{-6}\sim 5538.00\times 10^{-6}$,平均值为 800.14×10^{-6};铟含量的变化范围为 $5.61\times 10^{-6}\sim 125.00\times 10^{-6}$,平均值为 49.01×10^{-6}。

铁和铜的最低工业品位分别为 25%和 4000×10^{-6}(邵厥年等,2010),更乃矿床 11 件铁矿石中铁含量均达到工业品位要求,86 件岩矿石中有 2 件的铜含量达到工业品位要求。锡和锌的边界品位分别为 1000×10^{-6} 和 5000×10^{-6}(邵厥年等,2010),86 件岩矿石(其中测试锡含量只分析了 45 件样品)中有 2 件的锡含量达到边界品位要求,14 件的锌含量达到了边界品位要求。铋的地壳克拉克值为 0.004×10^{-6}(刘英俊等,1987),更乃矿床中铋含量平均值远远大于地壳克拉克值,表明铋在该矿床发生了强烈的富集作用。铋的边界品位为 500×10^{-6},工业品位为 1000×10^{-6}(何周虎等,2004),86 件岩矿石中有 4 件的铋含量达到边界品位要求,2 件达到工业品位要求,11 件铁矿石中有 4 件的铋含量达到边界品位要求,2 件达到工业品位要求,可见铋含量高的样品全为铁矿石。此外,班公湖-怒江成矿带上拉屋、舍索、北拉镇等 9 个矿区单件样品铋含量达到工业品位要求(赵元艺等,2010b;定立等,2012)。铟的工业品位为 10×10^{-6}(邵厥年等,2010;赵元艺等,2010b),86 件岩矿石中有 21 件达到工业品位要求,11 件铁矿石中有 10 件达到工业品位要求,铁矿石中的铟含量更高。此外,在班公湖-怒江成矿带的材玛、拉屋、雪如、尤卡朗等 5 个矿区铟的平均品位达到工业品位要求(赵元艺等,2010a)。

4 讨论

4.1 岩体形成的构造环境

花岗岩中 Nb、Ta、Ti 强烈亏损,Rb、K、Sr、Pb 明显富集是岛弧岩浆作用的本质特征(Wilson,1989),更乃似斑状二长花岗岩富集大离子亲石元素 Rb、Th,亏损 Sr,Ba,P,Ti 等元素(图 5a),不具有岛弧岩浆作用特征,在 Sr/Y-Y(图 7a)图解中没有落在经典的岛弧岩石范围。在 R2-R1 构造环境判别图(图 7b)上,位于造山晚期范围,显示为同碰撞花岗岩。在 Rb-(Yb+Nb)图解(图 8a)与 Nb-Y 图解(图 8b)中,也均显示为同碰撞花岗岩。在 ACF 判别图中,更乃似斑状二长花岗岩均落于 I 型花岗岩与 S 型花岗岩的交界处(图 9),为 I 型花岗岩向 S 型花岗岩过渡类型。

结合区域构造演化历史,笔者对更乃似斑状二长花岗岩岩体的构造背景进行了初步的探讨。更乃似斑状二长花岗岩岩体形成时代为 79 Ma 左右,明显晚于班公湖-怒江中特提斯洋盆的闭合时间(曲晓明等,2006),结合花岗岩构造环境判别图解,认为更乃花岗岩体为 I 型花岗岩向 S 型花岗岩过渡类型,形成于班公湖-怒江缝合带闭合之后的同碰撞阶段,为同碰撞环境。

4.2 铟与其他矿化元素的相关关系

铟(In)在自然界中一般难以富集,是 Ga、Ge、Tl、Cd 等稀散元素中最为分散的元素,铟矿物在自然界罕见,数量非常稀少,很难独立形成具有工业意义的矿床,铟主要富集于富锡硫化物矿石的闪锌矿中(涂光炽等,2003;张乾等,2003;朱笑青等,2006;

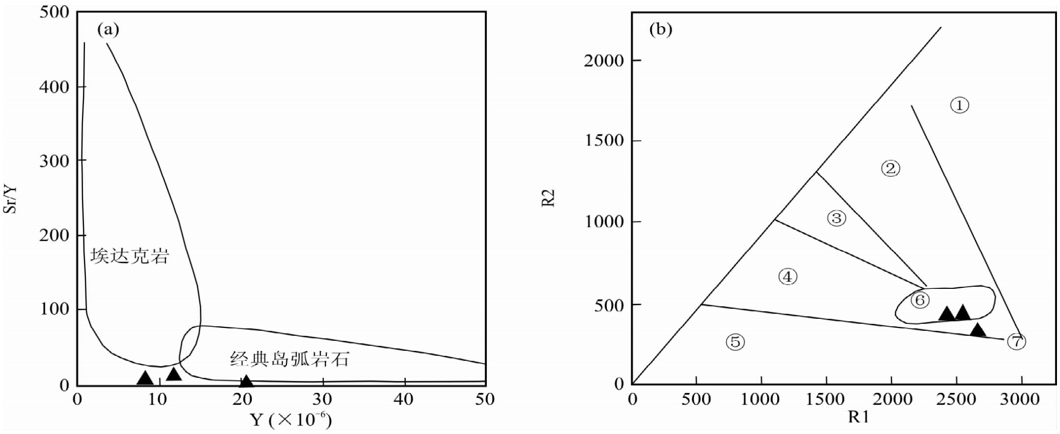

图 7　更乃似斑状二长花岗岩的 Sr/Y-Y(a)及 R2-R1(b)图解

Fig. 7　Sr/Y-Y (a) and R2-R1 (b) diagrams for Gengnai porphyritic monzonitic granite

①—地幔分异期;②—板块碰撞前期;③—碰撞后抬升期;④—造山晚期;⑤—非造山期;⑥—同碰撞期;⑦—造山后

①—Mantle differentiation period; ②—early period of plate collision; ③—period of lifting after the plate collision; ④—late period of orogenic; ⑤—period of non-orogenic; ⑥—period of syn－collision; ⑦—period after orogenic

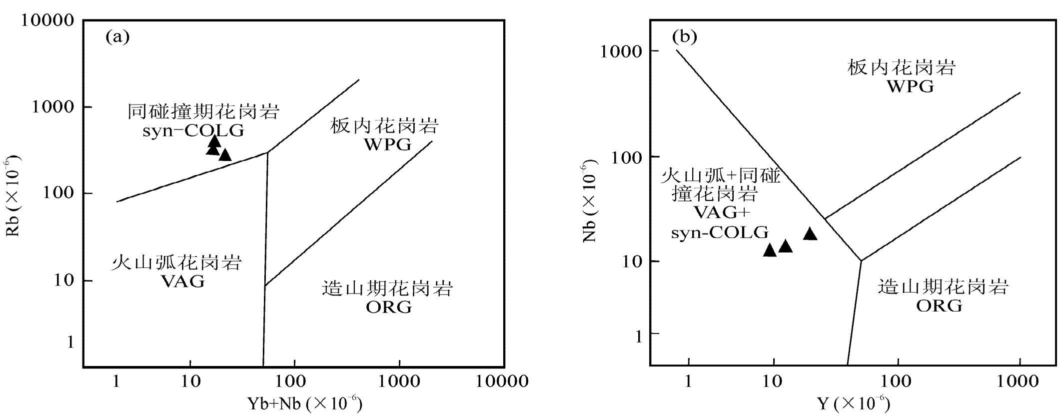

图 8　更乃似斑状二长花岗岩的 Rb-(Yb＋Nb) (a)及 Nb-Y(b)图解

Fig. 8　Rb-(Yb＋Nb) (a) and Nb-Y (b) diagrams for Gengnai porphyritic monzonitic granite

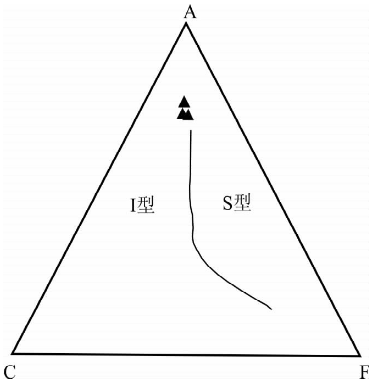

图 9　更乃似斑状二长花岗岩 ACF 判别图

Fig. 9　ACF identification diagrams for Gengnai porphyritic monzonitic granite

李晓峰等,2007)。在班公湖-怒江成矿带中,许多矿床(点)中铟和铋的含量达到了工业品位要求,特别是在更乃矿床中发现了铟的独立矿物自然铟与羟铟石(赵元艺等,2010a,2010b),这在国内尚属首次。班公湖-怒江成矿带富铟矿床的成因类型为矽卡岩型(赵元艺等,2010a,2010b),我国四川岔河锡矿铟的成因类型也为矽卡岩型(郭春丽等,2006)。一般来看,铟的矿化与锡、锌等有密切关系。富锡硫化物矿床中相当富集铟,锡在铟的富集中可能起着某种重要作用,闪锌矿是富 In 矿床中富集 In 的最主要对象(张乾等,2003;朱笑青等,2006;Seifert et al.,2006;Sinclair et al.,2006)。In 与 Sn 具有明显的正相关关系,In 与 Zn 也具有明显的正消长关系(朱笑青等,2006;郭春丽等,2006),In 与 Fe 有一定的正相关关系(郭春丽等,2006)。也有研究认为 In 与 Zn、Fe 之间不存在消长关系(张乾等,2003)。

本文根据国内典型的富铟矿床云南个旧锡多金

属矿床(贾润幸等,2005)、四川岔河锡矿床(郭春丽等,2006)、广西大厂锡多金属矿床、内蒙古蒙恩陶勒盖 Ag-Pb-Zn 矿床、云南都龙 Sn-Zn 矿床、广西佛子冲 Pb-Zn 矿床、辽宁桓仁 Pb-Zn 矿床(张乾等,2003;朱笑青等,2006)、广西铜坑-长坡、广西大福楼、广东金子窝、广东锯板坑(张乾等,2003)与更乃矿床中的 In、Sn、Zn 的含量做出富铟矿石中 In-Sn 以及 In-Zn 的关系图解(图 10a、b),研究 In-Sn 以及 In-Zn 的关系。除更乃以外的其他典型富铟矿床 In 含量与 Sn 含量的相关系数(r)为 0.60,In 含量与 Sn 含量存在明显的正相关关系(本文以相关系数 $r \geqslant 0.40$ 表示二者存在相关关系),相关曲线见图 10a,相关方程为 Sn=17.88In+316.30。而更乃矿床 In 含量与 Sn 含量的相关系数为 0.31,In 含量与 Sn 含量不存在相关关系。除更乃以外的其他典型富铟矿床 In 含量与 Zn 含量的相关系数为 0.40,In 与 Zn 存在较弱的正相关关系,相关曲线见图 10b,相关方程为 Zn=1127.87In−4912.38。而更乃矿床 In 与 Zn 的相关系数为 0.19,In 含量与 Zn 含量不存在相关关系。此外,还对更乃矿床 In 含量与 Fe 含量进行了相关关系分析,得到 In 含量与 Fe 含量的相关系数为 0.71,In 含量与 Fe 含量之间存在明显的正相关关系(图 11),相关曲线见图 11,相关方程为 Fe=0.76In+4.75。

4.3　成矿作用

由更乃矿床旋转正交因子主成分结果(表 6)可以看出,当取 8 个因子时,方差贡献累计百分比达 84.18%,即这 8 个因子包含了更乃矿床成矿过程中

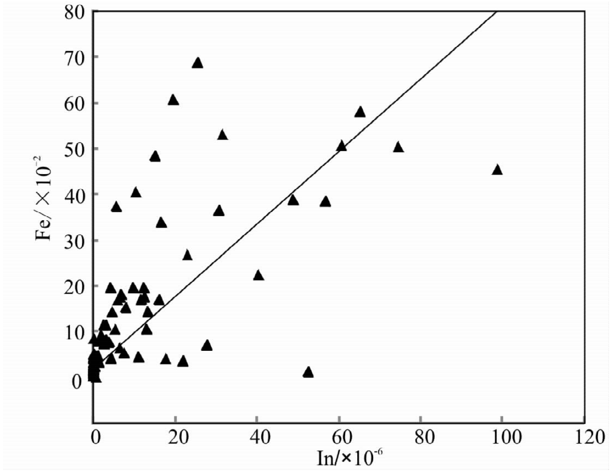

图 11　更乃矿床 In-Fe 关系图解

Fig. 11　Relationship diagrams of In-Fe in Gengnai deposit

80%多的信息,基本能反映出更乃矿床的成矿作用过程中的地质事件。因子的方差贡献百分比由 F1 到 F8 逐渐减小。其中,F1 因子主成分主要为稀土元素和 Ti、Sc、Al、Cr、Zr、P、U、Th 等造岩元素组合。锆石的形成发生在这一阶段,本文中锆石为岩浆锆石,稀土元素与 Zr 正相关,表明稀土元素为岩浆来源。F2 因子主成分主要为 Ba、K、Rb、Na、Th、Si、Sr 等造岩元素和 La、Ce 等稀土元素组合。K、Na、Si 等元素组合反映花岗岩成分,CaO 反映地层碳酸盐成分,二者呈负相关,代表矽卡岩化阶段。F3 因子主要为 U、Sn、Be、Cu 以及 Eu、Sm、Gd 等稀土元素的带入,Sn 的富集发生在这一阶段,Cu 在此阶段也有一定的富集。F4因子主成分主要为造岩

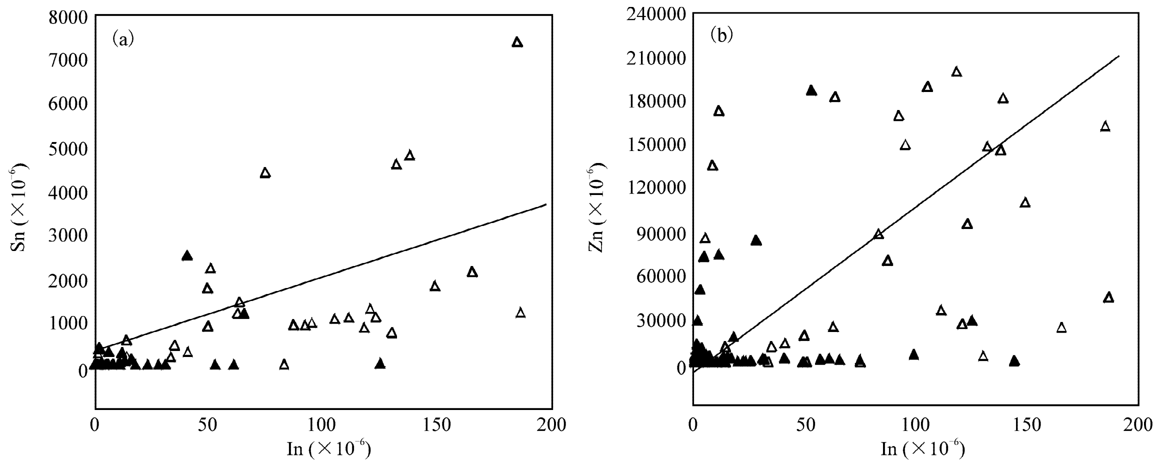

图 10　各矿床富铟矿石中 In-Sn(a)以及 In-Zn(b)关系图解

Fig. 10　Relationship diagrams of In-Sn (a) and In-Zn (b) for indium mineral in several deposit

▲—更乃矿床;△—除更乃以外的其他典型富铟矿床

▲—Gengnai deposit; △—typical indium deposits except Gengnai deposit

表 6　更乃矽卡岩型铁多金属矿床成矿作用因子分析的因子主成分特征

Table 6　The main factor characteristic of factor analysis for mineralization of Gengnai skarn-type iron deposit

因子	初始特征值		
	因子主成分	方差贡献百分比(%)	方差累积贡献百分比(%)
F1	Yb-Lu-Er-Ho-Tm-Y-Dy-TiO_2-Sc-Tb-Gd-Al_2O_3-Cr-Sm-Ga-Zr-Nb-Eu-Nd-Ta-P_2O_5-V-Pr-Hf-Ce-La-Th	42.52	42.52
F2	Ba-K_2O-Rb-Na_2O-Th-Tl-｜Ni｜-SiO_2-｜CaO｜-La-Ce-Pr-Ta-Nd-Sr-Nb	12.76	55.28
F3	U-Sn-Be-Eu-Sm-Gd-Cu	7.92	63.20
F4	W-Re-MgO-Hf-Li	5.86	69.06
F5	Co-Cd-MnO-Mo-Tl-Zn-Pb	5.38	74.44
F6	FeO-Fe_2O_3-In-Bi-｜CaO｜	3.83	78.27
F7	Cs-｜Sb｜-｜Pb｜-Sr	3.24	81.51
F8	｜Zn｜-｜Cu｜-｜Na_2O｜-｜SiO_2｜-CaO-｜In｜-｜Li｜-｜Sb｜-Sr-Pb	2.67	84.18

元素组合。F5 因子主成分主要为 Co、Cd、Mn、Mo、Zn、Pb 等金属元素组合，反映 Co、Mo、Zn、Pb 等的富集(或矿化)阶段。F6 因子主成分主要为 Fe、In、Bi 等矿化元素，更乃铁、铟、铋等金属矿物的形成就在此阶段形成，可以看出，更乃铁、铟、铋的成矿作用发生在同一期热液活动中。另外，In、Bi 元素为岩浆成分，更乃铁、铟、铋的成矿作用发生在同一期热液活动，表明铁的来源应该是岩浆来源。F7 因子主成分主要为 Cs、Sr 等大离子亲石元素，为造岩元素组合。F8 因子主成分中，Zn、Cu、In 等金属元素进一步富集与叠加。同时，SiO_2 和 CaO 呈负相关性，反映了又一期矽卡岩化阶段。

可以看出，更乃矿床中铟和锡分别属于 F6 和 F3 因子，铟和锌分别属于 F6 和 F8 因子，铟和铁均属于 F6 因子(且符号相同)，即铟与锡、铟与锌的成矿作用不相关，铟与铁具有正相关关系，与前面的相关性分析结果相同。这与在该矿床铟呈独立矿物羟铟石、自然铟形式存在以及铁矿石中铟含量高的事实具有一致性。可见，更乃矿床有着自己独特的铟矿化形式，与国内其他典型富铟矿床中铟的矿化形式不同。

4.4　矿床成岩时代及区域成矿意义

班公湖-怒江成矿带由西向东有材玛、弗野矽卡岩型铁矿床，尕尔穷、嘎拉勒矽卡岩型铜金铁矿床，多不杂斑岩型铜金矿床，拨拉杂斑岩型铜矿床，舍索矽卡岩型铜铅锌钼矿床，雄梅斑岩型铜矿床，梭沙、再阿矽卡岩型铁多金属矿床，雪如、查朗拉矽卡岩型铜铁矿床等。其成岩成矿时代(冯国胜等，2006，2007；曲晓明等，2006，2012；赵元艺等，2009，2011；杜德道等，2011；吕立娜等，2011；余红霞等，2011；定立等，2012；王江朋等，2012)大致可分为 3 个时段：156～106 Ma、92～86 Ma、80～76 Ma，均为燕山期成岩成矿。并且，由西向东矿床的成岩成矿年龄由老变新，表明班公湖-怒江成矿带岩浆活动在西部时代更早，而往东部岩浆活动逐渐变晚。

本文得到更乃矿床成岩年龄为 78.7±1.7 Ma，其花岗岩体是在班公湖-怒江中特提斯洋洋盆闭合碰撞之后形成，为燕山运动晚期的产物。锆石的微量元素及稀土元素特征(图 6)显示其为岩浆成因锆石，表明在燕山晚期(78.7±1.7 Ma)存在有岩浆活动。地理位置上，更乃矿床紧邻班公湖-怒江成矿带上的雪如、查朗拉、梭沙、再阿等矿床。综合认为，更乃矿床属于班公湖-怒江成矿带。

班公湖-怒江成矿带既有斑岩型矿床，又有矽卡岩型矿床。但从找矿成果看，班公湖-怒江成矿带以矽卡岩型铁、铜多金属矿床的个数占绝对优势。更乃矿床为班公湖-怒江成矿带一个矽卡岩型矿床，目前已有资料表明其规模较小。但是该矿床中铟呈独立矿物羟铟石和自然铟的形式存在，与国内其他典型富铟矿床不同，有着特殊的铟成矿意义。更乃矽卡岩型铁多金属矿床的发现，预示着班公湖-怒江成矿带及其邻区有发现其他与更乃相似的矽卡岩型矿床的潜力。由于铟与铁之间存在很好的正相关关系，因此，需要加强班公湖-怒江成矿带矽卡岩型铁矿床中铟资源的评价，以提高铁矿的经济价值。

5　结论

(1)更乃似斑状二长花岗岩为 I 型花岗岩向 S 型花岗岩过渡类型，形成于班公湖-怒江缝合带闭合之后的同碰撞阶段。

(2)更乃矿床中，铟与锡之间以及铟与锌之间不存在相关关系，铟与铁之间具有很好的正相关关系，铟呈独立矿物形式存在，铁矿石中铟含量高。铁、铟、铋金属的矿化是在同一期热液活动中形成，为岩

浆来源。

(3)更乃似斑状二长花岗岩 LA-ICP-MS 年龄为 78.7±1.7 Ma，为燕山运动晚期的产物。在班公湖-怒江成矿带上有发现其他与更乃相似的矽卡岩型矿床的潜力，需要加强该成矿带矽卡岩型铁矿床中铟资源的评价。

致谢：锆石测年由中国地质大学(北京)吴德新完成，锆石微量元素测试工作由西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明、第五春荣、弓化栋、庞云龙完成。岩矿石薄片矿物组合鉴定得到中国地质科学院矿产资源研究所刘妍副研究员的大力支持。常量元素的分析由夏晨光同志完成，微量元素的测试工作由张彦辉同志完成。野外工作期间，得到国家地质实验测试中心樊兴涛工程师、中国地质大学(北京)崔玉斌和郭硕以及中国地质科学院矿产资源研究所吕立娜的大力协助。论文工作得到中国地质科学院矿产资源研究所王瑞江所长、西藏地调院刘鸿飞院长、西藏班戈县乡镇企业管理局江材局长的鼓励与支持，特此致谢。

注 释

❶ 柴建玉，刘伟. 2009. 西藏班公湖-怒江成矿带找矿远景区评价. 河南省地质调查院.

参 考 文 献

定立，赵元艺，杨永强，崔玉斌，吕立娜. 2012. 西藏班戈县多巴区矽卡岩型铁多金属矿床含矿花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学及意义. 岩石矿物学杂志，31(4)：479～496.

杜德道，曲晓明，王根厚，辛洪波，刘治博. 2011. 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. 岩石学报，27(7)：1993～2002.

冯国胜，廖六根，陈振华，肖志坚. 2006. 西藏西部日土县材玛铁多金属矿地质特征及找矿意义. 地质通报，25(1～2)：267～272.

冯国胜，陈振华，廖六根，肖业斌. 2007. 西藏日土地区弗野玢岩铁矿的地质特征及找矿意义. 地质通报，26(8)：1042～1047.

郭春丽，王登红，付小方，赵支刚，傅德明，陈毓川. 2006. 四川岔河锡矿区富铟矿石的发现及其找矿意义. 地质评论，52(4)：550～556.

何周虎，李时谦，胡志科. 2004. 关于铋矿床工业指标的讨论. 华南地质与矿产，20(2)：32～34.

贾润幸，方维萱，赫英，高振敏，李红阳. 2005. 个旧超大型锡多金属矿稀土元素地球化学特征. 中国稀土学报，23(2)：228～234.

李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质调查与研究，33(3)：161～174.

李向民，马中平，孙吉明，余吉远. 2009. 甘肃白银矿田基性火山岩的 LA-ICP-MS 同位素年代学. 地质通报，28(7)：901～906.

李晓峰，Watanabe Yasushi，毛景文. 2007. 铟矿床研究现状及其展望. 矿床地质，26(4)：475～480.

刘妍，赵元艺，崔玉斌，吕立娜，聂凤军. 2011. 西藏舍索铜多金属矿床岩相学、矿相学特征及其成因意义. 岩石学报，27(7)：2109～2131.

刘英俊，曹励明. 1987. 元素地球化学导论. 北京：地质出版社，232.

吕立娜，崔玉斌，宋亮，赵元艺，曲晓明，王江朋. 2011. 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. 地学前缘，18(5)：224～242.

曲晓明，辛洪波. 2006. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境. 地质通报，25(7)：792～799.

曲晓明，王瑞江，代晶晶，李佑国，戚迅，辛洪波，宋杨，杜德道. 2012. 西藏班公湖-怒江缝合带中段雄梅斑岩铜矿的发现及意义. 矿床地质，31(1)：1～12.

芮宗瑶，侯增谦，曲晓明，张立生，王龙生，刘玉琳. 2003. 冈底斯斑岩铜矿成矿时代及青藏高原隆升. 矿床地质，22(3)：217～224.

邵厥年，陶维屏. 2010. 矿产资源工业要求手册. 北京：地质出版社，1～902.

涂光炽，高振敏. 2003. 分散元素成矿机制研究获重大进展. 中国科学院院刊，18(5)：358～361.

王江朋，赵元艺，崔玉斌，吕立娜，许虹. 2012. 西藏班戈地区重要矽卡岩型铁(铜)多金属矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年与花岗岩地球化学特征. 地质通报，31(9)：1435～1450.

吴元保，郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报，49(16)：1589～1605.

西藏地质矿产局. 2000. 西藏自治区区域地质志. 北京：地质出版社，1～707.

余红霞，陈建林，许继峰，王保弟，邬建斌，梁华英. 2011. 拉萨地块中北部晚白垩世(约 90 Ma)拔拉扎含矿斑岩地球化学特征及其成因. 岩石学报，27(7)：2011～2022.

袁洪林，吴福元，高山，柳小明，徐平，孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报，48(14)：1511～1520.

张乾，刘志浩，战新志，邵树勋. 2003. 分散元素铟富集的矿床类型和矿物专属性. 矿床地质，22(1)：309～316.

赵元艺，宋亮，樊兴涛，石登华，张天平，陈红旗，屈文俊. 2009. 西藏申扎县舍索铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年代学及地质意义. 地质学报，83(8)：1150～1158.

赵元艺，刘妍，崔玉斌，吕立娜，宋亮，曲晓明. 2010a. 西藏班公湖-怒江成矿带与邻区铟矿化带的发现及意义. 地质论评，56(4)：568～578.

赵元艺，刘妍，王瑞江，崔玉斌，吕立娜，宋亮，曲晓明. 2010b. 西藏班公湖-怒江成矿带及邻区铋矿化带的发现与意义. 地球学报，31(2)：183～193.

赵元艺，崔玉斌，吕立娜，石登华. 2011. 西藏舍索矽卡岩型铜多金属矿床年代学与地球化学特征及意义. 岩石学报，27(7)：2132～2142.

朱笑青，张乾，何玉良，祝朝辉. 2006. 富铟及贫铟矿床成矿流体中铟与锡铅锌的关系研究. 地球化学，35(1)：6～12.

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chemical Geology，192(1～2)：59～79.

Ballard J R，Palin J M，Williams I S，Campbell I H，Faunes A. 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the supergiant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by LA-ICP-MS and SHRIMP. Geology，29(5)：383～386.

Gao S，Liu X M，Yuan H L，Hattendorf B，Guenther D，Chen L，Hu S H. 2002. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. The Journal of Geostandards and Geoanalysis，26(2)：181～196.

Horn I，Rudnick R L，McDonough W F. 2000. Precise elemental and isotope ratio determination by simultaneous solution nebulization and laser ablation ICP-MS: application to U-Pb geochronology. Chemical Geology, 164(3～4): 281～301.

Kosler J, Fonneland H, Sylvester P, Sylvester P, Tubrett M, Pedersen R. 2002. U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies: a comparison of laser ablation ICP-MS and SIMS techniques. Chemical Geology, 182(2～4): 605～618.

Pan G T, Chen Z L, Li X C. 1997. Formation and Evolution of Geological Structure in East Tethyan. Beijing: Geological Publishing House, 53～58.

Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chemical Geology, 184(1～2): 123～138.

Seifert T, Sandmann D. 2006. Mineralogy and geochemistry of indium-bearing polymetallic vein-type deposits: implications for host minerals from the Freiberg district, Eastern Erzgbirge, Germany. Ore Geology Reviews, 28(1): 1～31.

Sinclair W D, Kooiman G J A, Martin D A, Kjarsgaard I M. 2006. Geology, geochemistry and mineralogy of indium resources at Mount Pleasant, New Brunswick, Canada. Ore Geology Reviews, 28(1): 123～145.

Wilson M. 1989. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach. London: Uniwin Hymen, 1～466.

Geochemical Characteristics, Chronology and Significance of Gengnai Skarn-Type Iron Polymetallic Deposit, Tibet

LI Xiaosai[1)], ZHAO Yuanyi[2)], WANG Jiangpeng[3)], XU Hong[1)]

1) *China University of Geosciences, Beijing*, 100083;

2) *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

3) *The First Geological Team of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi*, 831100

Abstract

Gengnai skarn deposit is located in southern middle Bangong Co-Nujiang River metallogenic belt, Tibet. It has good geological conditions for Fe and In mineralization. What's more, it is the first time to find natural indium and jalindite in this deposit in China. The deposit formed in the dimetasomatism when the porphyritic monzonitic granite invaded the Langshan limestone, and the porphyritic monzonitic granite provided magmatic hydrothermal sources for the mineralization. The K_2O/Na_2O values of porphyritic monzonitic granite are in the range of 1.38～1.73, showing the characteristics of potassium-rich. The A/CNK values of porphyritic monzonitic granite are in the range of 1.02～1.05. Gengnai rock mass belongs to peraluminous granite, with S-type granite characteristics. Rittmann index (σ) values are in the range of 2.15～2.31, and the porphyritic monzonitic granite is a calc-alkaline rock series. In Gengnai porphyritic monzonitic granite, large ion lithophile elements such as Rb, Th are enriched, and elements such as Sr, Ba, P, Ti are poor. It has higher total REE ($\sum REE = 108.03 \times 10^{-6} \sim 258.74 \times 10^{-6}$), and light and heavy REE has obviously fractionation with $(La/Yb)_N$ is 15.707 to 26.002. $\delta Eu = 0.171 \sim 0.238$, with medium negative Eu anomalies. Zircons in the porphyritic monzonitic granite are magmatic zircons. They are mostly columnar The Th/U values of zircons are in the range of 0.498～1.866, while the $(La/Yb)_N$ values are 0.00～0.29, light and heavy REE has obviously fractionation. The zircons have high positive Ce anomaly ($\delta Ce = 4.32 \sim 1293.43$) and medium negative Eu anomaly ($\delta Eu = 0.06 \sim 0.13$). The Gengnai rock mass occurred in the collision orogenic phase after the Bangong Co-Nujiang River ocean subducted to the South. Studies have shown that there is no correlation between indium and tin, also between indium and zinc, but it has positive correlation between indium and iron. Indium content values of the iron ore are in the range of $5.61 \times 10^{-6} \sim 125.00 \times 10^{-6}$, and the average is 49.01×10^{-6}, indium exist in the form of independent mineral. The mineralization of iron, indium, bismuth are formed in the same period of hydrothermal activity, and they are all magmatic source. The zircon LA-ICP-MS dating results of the porphyritic monzonitic granite is 78.7 ± 1.7 Ma, suggesting the porphyritic monzonitic granite was a product of late Yanshanian magmatism.

Key words: LA-ICP-MS zircon dating; skarn-type iron polymetallic deposit; gengnai deposit; indium and jalindite; Tibet