

南祁连亚曲含镍铜矿基性杂岩体形成年龄及机制探讨

张照伟^{1, 2)}, 李文渊^{1)*}, 高永宝^{1, 2)}, 张江伟¹⁾,
郭周平¹⁾, 李侃¹⁾, 王亚磊¹⁾, 钱兵¹⁾

1)西安地质矿产研究所, 陕西西安 710054;

2)长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西西安 710054

摘 要: 通过亚曲岩体的实地调查和研究, 利用 ID-TIMS 方法对岩体定年, 获得 (440.74 ± 0.33) Ma 成岩年龄, 为加里东期。岩石地球化学特征分析及区域对比研究表明, 亚曲基性杂岩体以低 Ti、亏损 Nb 和 Ta、富集轻稀土元素和大离子亲石元素为特征。结合其同位素特征, 提出该岩体的形成与祁连山及其邻区 460~440 Ma 时期俯冲向碰撞转换的作用有关, 可能是岛弧岩浆作用的结果。这对于南祁连化隆一带区域铜镍找矿具有重要意义, 亦对丰富完善早古生代岩浆铜镍硫化物矿床的研究和形成机制具有借鉴作用。

关键词: 基性杂岩体; ID-TIMS 年龄; 形成机制; 铜镍矿; 亚曲

中图分类号: P588.124; P597 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.06.11

The Formation Age of the Yaqu Ni-Cu Bearing Basic Complex in Southern Qilian Mountain and a Discussion on Its Mechanism

ZHANG Zhao-wei^{1, 2)}, LI Wen-yuan¹⁾, GAO Yong-bao^{1, 2)}, ZHANG Jiang-wei¹⁾,
GUO Zhou-ping¹⁾, LI Kan¹⁾, WANG Ya-lei¹⁾, QIAN Bing¹⁾

1) Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an, Shaanxi 710054;

2) College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054

Abstract: This paper reports partial achievements in potential evaluation of magmatic type copper-nickel ore resources in Hualong County, Qinghai Province, mainly by field survey and investigation of Yaqu intrusive rocks, and obtained the zircon U-Pb age of rock formation (442.4 ± 1.6) Ma by ID-TIMS. Geochemical studies of the basic complex closely associated with the deposit show that it is characterized by low Ti, depletion of Nb or Ta and enrichment of LREE and large lithophile elements. These features, combined with the isotope geochemistry, have led the authors to believe that the magma occurred under the condition of the conversion of subduction to collision in 460~440 Ma in the Qilian Mountain and its adjacent areas, and might have resulted from arc magmatism. The results not only have great significance for regional prospecting of Ni-Cu ore resources in Hualong area but also have reference value for enrichment of the knowledge of early Paleozoic magmatic Ni-Cu sulfide deposits and their formation mechanism.

Key words: basic complex; ID-TIMS age; formation mechanism; Ni-Cu deposit; Yaqu

青海省有八条基性-超基性岩带, 且多数岩体与成矿关系密切。具体到化隆基性-超基性岩带, 不仅是青海省八条基性-超基性岩带之一, 更重要的是多数基性-超基性岩体与铜镍成矿关系密切。在长

本文由国家自然科学基金(编号: 40772062, 41102050)和中国地质调查局地质大调查项目(编号: 1212010911032, 1212011220897, 121201112088 和 1212011121092)联合资助。

收稿日期: 2012-08-11; 改回日期: 2012-10-17。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 张照伟, 男, 1976 年生。助理研究员, 博士研究生。主要从事岩浆作用矿床及区域成矿研究。通讯地址: 710054, 西安市友谊东路 438 号。E-mail: zhaoweiz@126.com。

*通讯作者: 李文渊, 男, 1962 年生。研究员, 博士生导师。主要从事岩浆铜镍硫化物矿床与区域成矿研究。通讯地址: 710054, 西安市友谊东路 438 号。E-mail: xalwenyuan@126.com。

160 km, 宽 8~20 km 不等, 西窄东宽的楔形地带, 产出有 32 个大小不同的基性-超基性杂岩体, 这些岩体的含矿性目前尚不清楚。要解决这个问题, 关键要查清这些岩体的成因以及岩体形成时的地球动力学背景, 结合亚曲典型矿床的剖析研究, 从岩体形成时代和区域研究入手, 试图探讨岩体的形成机制。前人对该矿床已进行了一些简单研究(矿石的结构构造、矿石地球化学以及稳定同位素等), 尽管对其具体的形成过程还存在不同的看法(刘应汉, 2003; 赵恒川等, 2007; 申勇胜等, 2009; 汤中立等, 1987; 李文渊, 1996, 2004, 2006; 樊光明等, 2007; 张照伟等, 2009, 2011, 2012a, b), 但归结起来主要认为铜镍硫化物的形成与岩浆的熔离作用以及结晶分异作用相关, 很少从岩体的岩石地球化学角度探讨该岩体的成因进而研究其形成机制(高永宝等, 2012; 王登红等, 2001; 张招崇等, 2003; 钱壮志等, 2009)。同样, 对于侵入到化隆群中的基性-超基性岩带, 其岩体形成时代也备受争议, 有晋宁期之说和加里东期之说, 但都没有精确的年龄数据, 多是经过地层穿插及岩体侵入先后顺序推测。该岩带形成于什么样的构造背景, 其地球动力学背景如何? 对此我们选择了化隆基性-超基性岩带中典型的亚曲岩体作为精确定年的对象, 通过 ID-TIMS 精确定年, 旨在阐明岩体形成时代及侵位构造背景, 解释其地质意义。

化隆岩带在大地构造位置上属祁连褶皱系与松

潘甘孜褶皱系之间的化隆晚元古隆起带, 其南邻秦岭褶皱带西延部分, 北部为拉脊山加里东褶皱带。区内岩浆活动频繁, 侵入岩广泛分布, 构造运动强烈, 矿化现象不甚普遍。构造岩带主要地层是元古界化隆群, 其次是少量的中、新生界地层。化隆群分布于整个岩带, 北西端起自青海湖北的刚察县, 经日月山、拉脊山以南至贵德县的阿什贡, 到尖扎、循化黄河沿岸以北地带, 它是化隆岩带基性-超基性岩侵入的主要围岩(图 1), 岩性为中深变质的片岩、片麻岩夹大理岩及石英岩, 混合岩化显著。

1 岩体地质、地球化学特征

亚曲岩体地表出露宽 10~25 m, 向深部 230 m 深度位置增至 80 m 左右(水平宽), 发育黄、棕褐色氧化带。走向北西, 向北东倾斜, 呈北北西—北侧伏, 其南端延深 260 m, 向北部延深 200 m 以上(尚未控制)。岩体的形态比较复杂, 其北段为较简单的薄透镜状; 岩体南段地表被片麻状闪长岩残余体所隔, 分成两枝, 向深部合二为一, 并有尖灭趋势。岩体的围岩主要是一套化隆岩群的沉积变质岩, 主要岩石类型有灰黑色石英、云母片岩、石英角闪片岩夹灰白色含石墨质大理岩、紫灰色黑云母片岩、条带状黑云母片麻岩、角闪片岩及角闪斜长片麻岩, 局部有花岗岩和闪长岩脉贯入(图 2)。亚曲岩体基本上为辉长-辉石岩-闪长岩岩体, 可以划分为辉长岩、辉

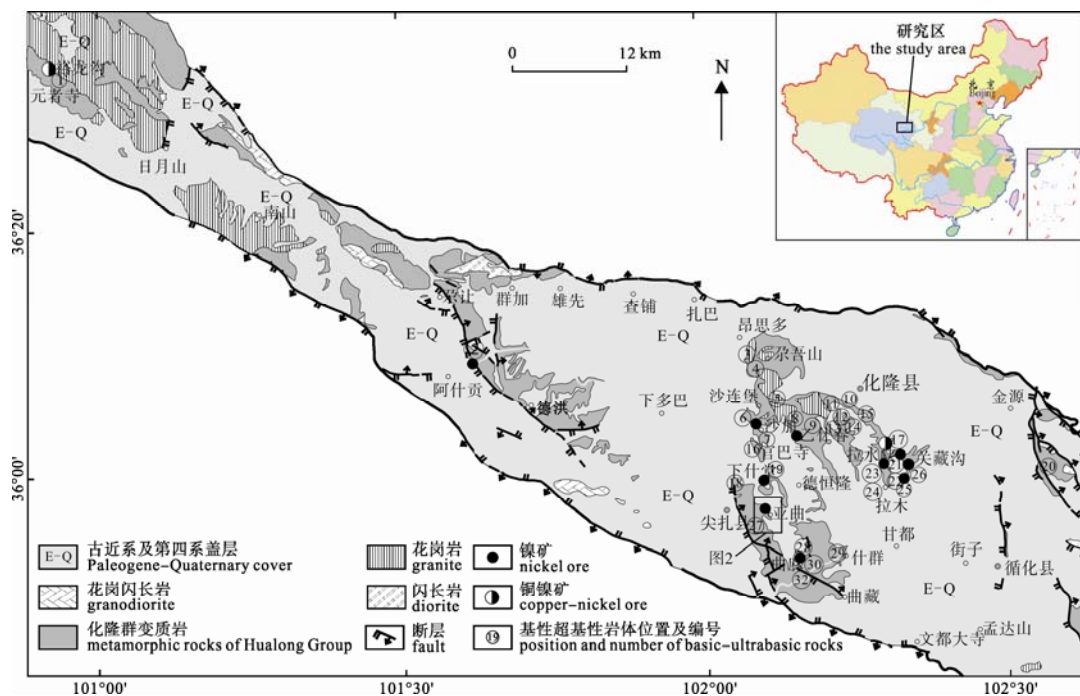


图 1 青海省化隆一带区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of Hualong County, Qinghai Province

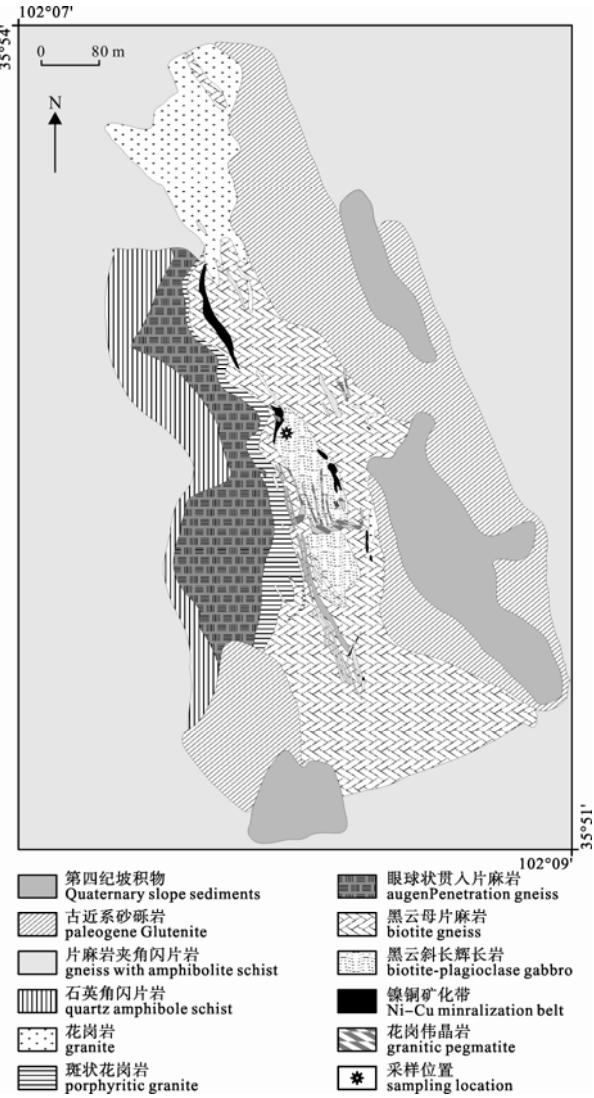


图 2 亚曲岩体平面地质图
Fig. 2 Geological map of Yaqu intrusive rocks

长-辉石岩和闪长岩三个岩相带，岩石类型主要为角闪石化辉长-辉石岩、角闪石化黑云母辉长岩及石英闪长岩。

角闪石化辉长-辉石岩主要分布于亚曲岩体的南段靠中下盘，特别在氧化带地段最为典型。主要由斜方辉石(紫苏辉石)(约 35%)、单斜辉石(约 20%)、角闪石(约 10%)、斜长石(约 35%)组成，其次可见少量黑云母(约 3%)和石英(约 2%)。金属硫化物见有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿等呈浸染状分布于岩石中，也有呈细脉状充填于岩石节理中。角闪石化黑云母辉长岩主要分布在岩体南段的上盘和北段。主要由浅棕色角闪石(约 10%)、辉石(约 50%)、斜长石(约 35%)、黑云母(约 10%)和少量石英、磷灰石等组成，金属硫化物含量不多。石英闪长岩主要有紫苏辉石石英闪长岩和黑云母石英闪长岩。

在亚曲岩体硅酸盐全分析中(表 1)，MgO 含量(3.22%~14.83%)变化较大，FeO+Fe₂O₃ 含量变化较小，为 4.95%~10.79%，平均值为 7.19%。Al₂O₃ 值在 10.4%~20.01%，平均值为 15.92%，变化范围大。CaO 含量介于 4.51%~9.36%之间，平均值为 6.43%。Na₂O 的含量介于 1.58%~3.28%之间，平均值为 2.39%。K₂O 含量介于 0.15%~2.65%，平均值为 1.55%。TiO₂ 含量介于 0.56%~0.91%，平均值为 0.74%。亚曲岩体岩石的 m/f 值大部分介于 1.0~2.0 之间，与吴利仁(1963)划分的铁质基性岩特征一致，属于铁质类型的基性岩。在 SiO₂-Na₂O+K₂O 图上，样品均投影在亚碱性系列区(图 3)。在 AFM 图解上，样品投影于钙碱性系列区(图 4)。

表 1 亚曲岩体主量元素分析结果表(wt%)
Table 1 Major elements analyses of Yaqu intrusion (wt%)

样号	岩石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	Total	MgO/TFeO	Mg [#]
YQ-1	苏长岩	58.35	10.82	9.89	11.64	4.51	1.87	1.56	0.14	0.25	0.81	2.54	99.85	2.1	0.46
YQ-2	闪长岩	62.2	17.4	5.73	3.6	5.25	2	2.65	0.09	0.19	0.76	2.69	100.01	1.1	0.62
YQ-3	闪长岩	60.96	17.87	5.73	3.43	5.86	3	1.88	0.09	0.22	0.85	1.59	99.75	1	0.63
YQ-4	闪长岩	62.6	17.59	5.25	3.22	5.64	2.85	1.76	0.09	0.17	0.72	1.88	100.07	1.1	0.62
YQ-5	辉长岩	51.71	20.01	9.45	6.23	9.36	1.58	0.69	0.15	0.1	0.56	2.39	100.29	1.2	0.61
YQ-6	闪长岩	62.82	17.6	5.16	3.22	5.47	2.94	1.73	0.09	0.17	0.68	1.65	99.75	1.1	0.62
YQ-7	闪长岩	62.14	18.11	4.95	3.25	5.44	3.28	1.83	0.08	0.16	0.64	1.75	99.66	1.2	0.61
YQ-8	辉长岩	57.64	16.22	6.71	6.87	7.28	3.08	1.15	0.12	0.16	0.64	2.27	100.3	1.8	0.5
YQ-9	辉长岩	55.72	17.98	6.52	6.19	8.91	2.85	0.76	0.11	0.15	0.68	2.05	99.92	1.7	0.52
YQ-10	辉长岩	51.71	10.4	10.79	14.83	8.51	0.91	1.45	0.22	0.04	0.91	3.86	99.85	2.4	0.43
YQ-11	苏长岩	59.13	11.15	8.96	11.33	4.52	1.96	0.15	0.14	0.17	0.84	2.39	99.9	2.2	0.45

注：数据由中国地质调查局西安调查中心实验测试中心分析；Mg[#]=Mg/(Mg+Fe)，以FeO代表TFeO。仪器型号为SX-50型 ICP-MS 等离子体质谱仪。

亚曲岩体微量元素分析如表 2 所示, 总体上显示出相容元素(如 Ni、Cr、Co、V)含量低, 不相容元素(如 Rb、Ba、Th 等)含量高的特点。在其不相容元素原始地幔标准化图解上(图 5), 总体显示出较为一致的分布模式, 可以看出其富集大离子亲石元素(Sr、Rb、Ba)和相对亏损高场强元素(Nb、Ta、Hf、Zr)。与原始地幔(17.8 与 37)(McDonough et al., 1995)和地壳相应值(11 和 33)(Taylor et al., 1985)不同, 其 Nb/Ta 比值为 9.81~17.19, 平均 14.96; Zr/Hf 比值为 31.3~40.0, 平均 38.56。在亚曲岩体过渡金属元素含量中, 与原始地幔相比, 所有样品均具 Cr、Ni 的负异常, Ti 的正异常(图 6)。

亚曲岩体的稀土总量(ΣREE)介于(55.13~142.41) $\times 10^{-6}$ 之间, 稀土元素分析数据见表 3, 大部分样品 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值较高, 介于 2.09~13.06 之间。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 介于 1.23~4.28 之间, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 介于 1.36~2.08 之间, 表明轻重稀土元素分馏较强, 而轻、重稀土元素内部

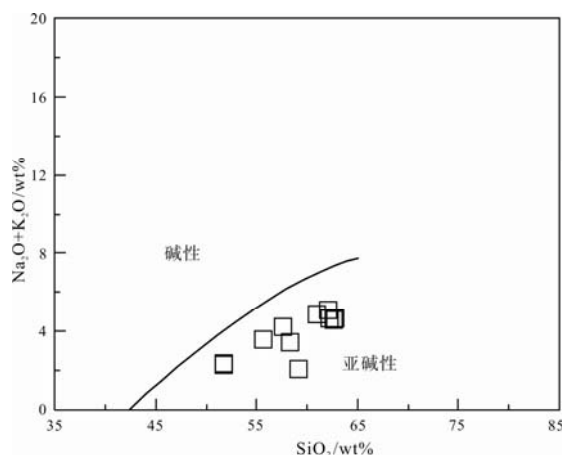


图 3 亚曲岩体全碱-硅(TAS)图解
Fig. 3 Total alkali versus silica (TAS) diagram of Yaqu intrusion

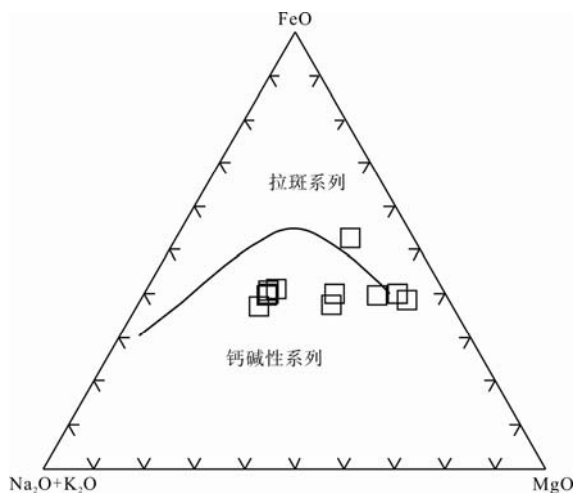


图 4 亚曲岩体 AFM 图解
Fig. 4 AFM diagram of Yaqu intrusion

之间的分馏都较弱。亚曲岩体球粒陨石标准化分配曲线表现为轻稀土富集型特征(图 7), 各样品的 δEu 介于 0.41~0.77 之间, 显示明显的负异常。

2 分析方法

岩体中采集样品 15 kg, 采样位置如图 2 所示。样品岩性为辉石岩相, 锆石分选工作在河北省区域地质调查研究院实验室进行, 常规碎样至 120 目后手工淘洗, 挑选出锆石进行年龄测定。

在加拿大多伦多大学杰克萨特利(Jack Satterly)年代学实验室采用同位素稀释热电离质谱法(isotope dilution thermal ionization mass spectrometry)(ID-TIMS)进行锆石 U-Pb 同位素分析。分析之前, 锆石晶体颗粒经热退火并在 HF 酸中部分溶解, 以此彻底消除出现 Pb 丢失的蚀变区域同时提高一致性和谐度。这些区域与在蚀变前遭受辐射破坏的高 U 区域相关。前处理时, 首先将锆石颗粒置于 1000℃ 马弗炉中加热大约 60 h, 以修复辐射损伤和退火晶格, 接下来就是单步部分溶解过程, 用 50%HF 酸 0.10 mL 和 7 mol/L HNO₃ 酸 0.020 mL 聚四氟乙烯溶解皿中于 195℃ 的温度下溶解 6~12 h(Barnes et al., 1997)。通过硝酸和丙酮清洗, 每个锆石晶体颗粒的尺寸和重量进行测量和称重, 通过样品装载, ²⁰⁵Pb-²³³U-²³⁵U 示踪剂溶液被加到马弗炉器皿中。利用浓的 HF 酸 0.10 mL 和 0.02 mL 的 7 mol/L HNO₃ 酸于 195℃ 的温度下溶解 3~5 d, 锆石被溶解, 并再溶解于 0.15 mL 的 3 mol/L 的 HCl 酸中(Krogh, 1973)。使用盐酸通过离子交换色谱使 U 和 Pb 从溶液中分离出来, 并将分离出来的样品沉积在已经涂有硅胶的铯灯丝上, 在 VG354 质谱仪上进行分析, 应用戴利探测器的脉冲计数模式计算 Pb 和

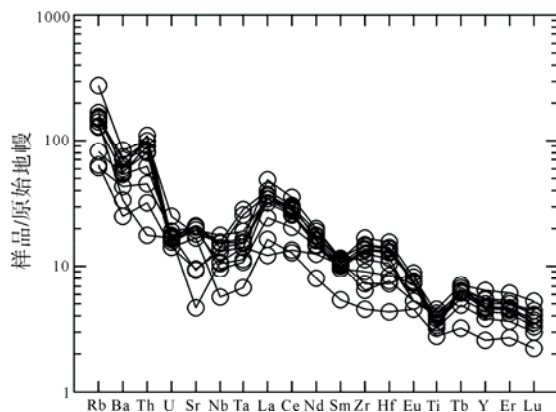


图 5 亚曲岩体不相容微量元素原始地幔分配模式图
(据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Primitive mantle distribution patterns for incompatible trace elements in Yaqu intrusive rocks (after Sun et al., 1989)

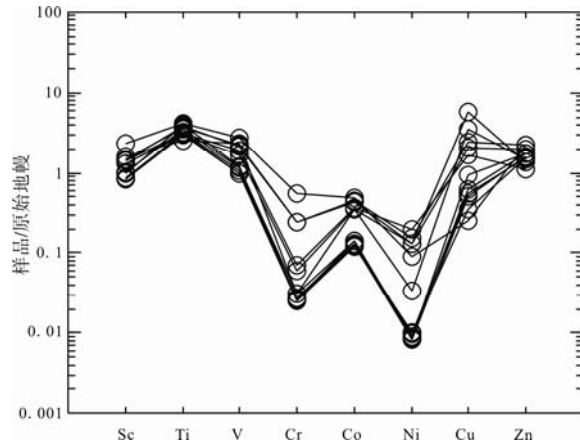


图 6 亚曲岩体相容微量元素原始地幔配分模式图
(据 Sun et al., 1989)

Fig. 6 Primitive mantle distribution patterns for compatible trace elements in Yaqu intrusive rocks
(after Sun et al., 1989)

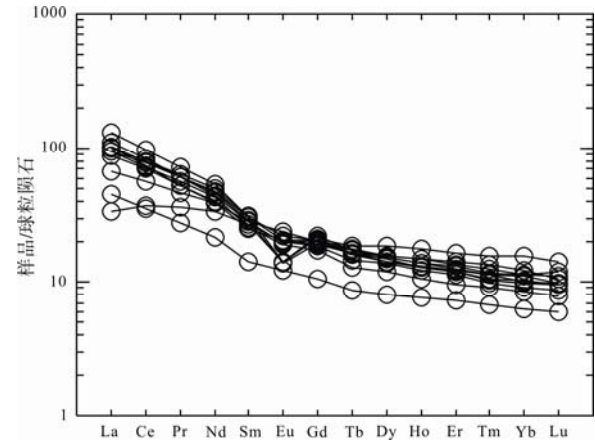


图 7 亚曲岩体 REE 球粒陨石标准化分布型式图
(球粒陨石数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite normalized REE patterns of Yaqu intrusive rocks
(chondrite data after Sun et al., 1989)

表 2 亚曲岩体微量元素分析结果表(单位: 10^{-6})
Table 2 Trace elements analyses of Yaqu intrusion (unit: 10^{-6})

样号	YQ-1	YQ-2	YQ-3	YQ-4	YQ-5	YQ-6	YQ-7	YQ-8	YQ-9	YQ-10	YQ-11
岩石类型	苏长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	辉长岩	闪长岩	闪长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	苏长岩
Sc	25.6	17.5	16.6	14.2	27.5	14.8	14.4	22.4	24.7	39.8	23.8
V	185	96.6	98.9	88.9	196	82.4	81.9	138	158	225	179
Cr	744	91.7	78	83.8	92.9	79.6	75.8	177	210	1660	723
Co	47.3	14.6	14.8	13.7	37.3	13.4	12.5	37.5	38.8	52.2	44.8
Ni	319	18.3	18.8	20.6	71.5	17.4	21.3	270	416	188	271
Cu	70	27.3	17.8	16	99.7	14.8	10.2	165	47	7.31	58.8
Zn	108	85.1	84.6	74.2	71.5	77.6	74.6	65.6	54.4	108	95
Rb	76.1	166	94	89.7	38.8	102	92.4	49.7	36.6	84.2	79.7
Ba	375	559	466	489	166	395	409	353	288	222	369
Th	6.37	7.96	7.87	6.54	2.58	8.87	7.9	5	3.6	1.41	7.15
U	0.29	0.51	0.32	0.33	0.29	0.34	0.35	0.36	0.39	0.34	0.36
Ta	0.53	0.61	0.7	0.58	0.25	1.04	0.94	0.42	0.4	0.52	0.56
Nb	8.61	10.4	11.7	9.97	3.78	10.2	9.42	6.87	6.29	7.11	9.35
La	23.7	31.3	22.6	21	10.7	26.2	24.1	22.4	15.9	7.89	24.3
Ce	49.4	59.9	47.6	42.8	21.4	51.3	46	44.6	34.6	22.5	48.7
Sr	190	360	392	386	334	409	414	393	410	93.2	186
Nd	23.6	25	22.1	18.6	10	20.8	18.3	20	18.2	15.7	21.8
Hf	2.95	4.01	4.48	3.72	1.22	3.89	3.6	2.39	2.04	2.15	3.3
Zr	118	158	176	146	47.2	153	143	94.8	77.1	67.3	131
Sm	4.74	4.72	4.64	4.11	2.19	4.32	3.87	3.88	4.34	4.13	4.46
Tb	0.64	0.61	0.6	0.55	0.32	0.66	0.62	0.48	0.64	0.7	0.61
Y	21.5	19.8	19.6	18.6	11	23	23.7	16.3	20.4	27.4	20.1
Yb	1.91	1.67	1.75	1.56	1.07	1.92	2.08	1.44	1.72	2.63	1.88
Nb/Ta	16.25	17.05	16.71	17.19	15.12	9.81	10.02	16.36	15.73	13.67	16.7
Zr/Hf	40	39.4	39.29	39.25	38.69	39.33	39.72	39.67	37.79	31.3	39.7

注: 数据由中国地质调查局西安调查中心实验测试中心分析, 仪器型号为 SX-50 型 ICP-MS 等离子体质谱仪。

表 3 亚曲岩体稀土元素分析结果表(单位: 10⁻⁶)
Table 3 Rare earth elements analyses of Yaqu intrusion (unit: 10⁻⁶)

样号	YQ-1	YQ-2	YQ-3	YQ-4	YQ-5	YQ-6	YQ-7	YQ-8	YQ-9	YQ-10	YQ-11
岩石名称	苏长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	辉长岩	闪长岩	闪长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	苏长岩
La	23.7	31.3	22.6	21	10.7	26.2	24.1	22.4	15.9	7.89	24.3
Ce	49.4	59.9	47.6	42.8	21.4	51.3	46	44.6	34.6	22.5	48.7
Pr	6.08	6.86	5.74	5.05	2.62	5.74	5.03	5.32	4.44	3.47	5.74
Nd	23.6	25	22.1	18.6	10	20.8	18.3	20	18.2	15.7	21.8
Sm	4.74	4.72	4.64	4.11	2.19	4.32	3.87	3.88	4.34	4.13	4.46
Eu	0.82	1.18	1.28	1.16	0.7	1.12	1.18	1.11	1.38	0.82	0.81
Gd	4.55	4.18	4.21	3.79	2.16	4.2	3.93	3.53	4.1	4.32	4
Tb	0.64	0.61	0.6	0.55	0.32	0.66	0.62	0.48	0.64	0.7	0.61
Dy	3.92	3.8	3.6	3.52	2.03	4.02	3.99	3.02	3.86	4.72	3.62
Ho	0.78	0.73	0.72	0.69	0.43	0.85	0.85	0.6	0.78	0.99	0.75
Er	2.17	1.96	1.97	1.86	1.19	2.21	2.32	1.59	2.06	2.69	2.02
Tm	0.3	0.26	0.27	0.25	0.17	0.32	0.34	0.23	0.29	0.4	0.29
Yb	1.91	1.67	1.75	1.56	1.07	1.92	2.08	1.44	1.72	2.63	1.88
Lu	0.3	0.24	0.24	0.22	0.15	0.28	0.27	0.2	0.25	0.36	0.25
ΣREE	122.91	142.41	117.32	105.16	55.13	123.94	112.88	108.4	92.56	71.32	119.23
δEu	0.41	0.62	0.68	0.69	0.76	0.62	0.71	0.7	0.77	0.46	0.45
(La/Yb) _N	8.64	13.06	9	9.38	6.97	9.51	8.07	10.84	6.44	2.09	9
(La/Sm) _N	3.23	4.28	3.14	3.3	3.15	3.92	4.02	3.73	2.37	1.23	3.52
(Gd/Yb) _N	1.98	2.08	2	2.02	1.67	1.81	1.57	2.03	1.98	1.36	1.77

注: 数据由中国地质调查局西安调查中心实验测试中心分析, 仪器型号为 SX-50 型 ICP-MS 等离子体质谱仪。

U, 或者运用多法拉第富集模式收集 Pb 并且用静态模式收集 U。Pb 和 U 测量系统测量时间为 21.5 ns。戴利探测器修正偏差为一常数, 每原子质量单位 0.05%。利用 SRM982 标准 Pb 对放大器和达利特性进行监控。每原子质量单位热分馏校正 0.10%恰对应于铅的 0.06%误差(2σ), 同时 U 分馏出来。假设最初岩浆中 Th/U 比值为 4.2, 利用锆石中的 ²³⁰Th 不平衡进行 ²⁰⁶Pb-²³⁸U 对 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 的年龄校正 (Campbell et al., 1979)。锆石中所有普通铅被分配到铅空白处, U 空白估计为 0.01 pg。U/Pb 比值的标定误差为 0.04%(2σ)。所有年龄误差标记在文本和表中, 并在谐和图给出在 95%置信区间的误差椭圆。使用 ISOPLOT 程序 3.00 进行绘图和年龄计算(张照伟等, 2012b)。

3 分析结果及讨论

亚曲黑云母斜长辉长岩(09YQ-05)中的锆石绝大多数为烟灰色、浅烟灰色、浅黄色半自形柱状特征(部分残缺锆石属于碎样时机械破损, 或者碎样目数较细所致), 少数为浅玫瑰红色浑圆状, 粒径多在 80 μm×60 μm 至 120 μm×90 μm。锆石 CL 图像(图

8)显示, 锆石呈浅灰-深灰色, 少数具有内核(图 8-B), 多数发育有环带结构(图 8A、C、D), 且 Th/U 比值一般在 0.62~0.90 之间(表 4), 具岩浆结晶锆石特征。

亚曲(09YQ-05)样品在加拿大多伦多大学进行了 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄测定(表 4、图 9), 获得锆石 U-Pb 年龄为(440.74±0.33) Ma (MSWD=1.1), 属早志留世, 为加里东期岩体, 侵入于元古界化隆群中。

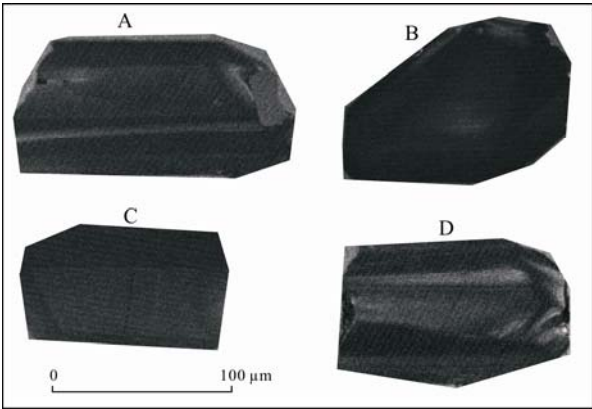


图 8 亚曲岩体辉石辉长岩锆石 CL 图像
Fig. 8 CL images of zircon from pyroxenite of Yaqu intrusive body

表 4 青海省亚曲岩体 ID-TIMS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 4 U-Th-Pb isotopic data of Yaqu mafic intrusions, Qinhai Province

编号	质量 /mg	U/ 10^{-6}	Th/U	$Pb_C/10^{-12}$	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{206}Pb_C/\%$	$^{207}Pb_C/\%$	$^{206}Pb/^{238}U$	
								比值	2σ
sk30p13	0.016	171	0.62	0.6	20711	0.09	1.38	0.07083	0.00011
sk30p14	0.010	421	0.70	0.6	33982	0.05	0.84	0.07075	0.00014
sk30p15	0.019	410	0.90	0.6	61673	0.03	0.46	0.07066	0.00014
sk30p16	0.047	216	0.72	2.8	16688	0.11	1.71	0.07076	0.00008

编号	质量 /mg	$^{207}Pb/^{235}U$		误差相关系数	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄/Ma		$^{207}Pb/^{235}U$ 年龄	
		比值	2σ		比值	2σ	年龄/Ma	2σ
sk30p13	0.016	0.5443	0.0013	0.833	441.13	0.65	441.26	0.83
sk30p14	0.010	0.5433	0.0016	0.786	440.70	0.86	440.62	1.05
sk30p15	0.019	0.5428	0.0015	0.853	440.16	0.85	440.29	0.96
sk30p16	0.047	0.5435	0.0012	0.768	440.72	0.50	440.73	0.80

注: 表中元素的下角标 c 表示普通铅。

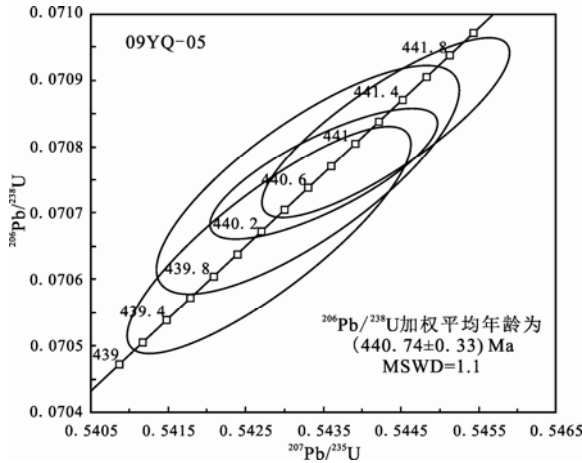


图 9 亚曲岩体锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 9 Concordia diagrams showing U-Pb analyses of zircons from Yaqu intrusion

利用 ID-TIMS, 首次获得了亚曲岩体(09YQ-05)的锆石 U-Pb 年龄为(440.74±0.33) Ma (MSWD=1.1), 也是在南祁连化隆基性-超基性岩带中获得的首个基性-超基性侵入岩精确年龄数据。与中祁连地块基性-超基性岩体年龄相近, 秦祁造山带结合部陇山岩群中的基性岩的年龄为(442.8±1.1)~(440±1.7) Ma, 中祁连马衔山岩群内基性岩的年龄为(441.1±1.4) Ma(陈隽璐等, 2006; 何世平等, 2008)。

祁连山造山带是秦祁昆巨型造山带的组成部分, 属于中国中央造山带。新元古-早古生代秦祁昆大洋具有复杂的结构形式, 洋中有块、块中有裂隙是其主要特征之一(汤中立等, 1995; Barnes et al., 1985; Mckenzie et al., 1988; DePaolo et al., 1981)。大陆裂解形成一系列大小不等的海洋盆地, 而会聚可使其盆地关闭, 经造山作用使堆积物发

生变质变形。板块的裂解与关闭实际上是构造旋回中的一个开合过程的具体体现, 由于这种开合可以是原地开合, 也可以是异地开合, 最终使这些原来相关或不相关的一系列陆块聚合在一起, 形成新的大陆块。祁连山地体是经加里东末期板块碰撞而形成的典型加里东造山带, 祁连山南东段是祁连山造山带的尾端, 该造山带有着复杂的物质组合和漫长的构造演化历史(Rad'ko, 1991; Naldrett et al., 1993; 孙涛等, 2012)。中祁连地块是秦祁昆洋中陆块群中的一个, 由新元古代以前的古老变质岩系组成, 其上发育有裂陷槽, 南祁连、拉脊山就是地块进一步裂解形成的两个盆地(或小洋盆), 它们是在加里东期闭合形成的造山带(Brügmann et al., 2001; Lightfoot et al., 1993; 吕林素等, 2007; 王团华等, 2009)。

亚曲岩体所代表的基性-超基性岩带恰处于祁连造山带的南东段, 该岩带的所有基性-超基性岩体都无一例外地侵入在元古界化隆群中, 化隆群是一套以石英岩、黑云石英片岩、二云母片岩、石英片岩、角闪片岩、黑云斜长片麻岩、混合片麻岩和混合岩为主体, 变质程度较深的中-深变质岩系。基性岩墙群代表地质历史时期的伸展裂解事件, 其形成时代可以代表裂解的初始时限, 可为造山前期的地质作用过程提供研究基础。其变质变形又包含有造山过程区域构造作用叠加、改造的信息, 为造山过程的动力学研究提供了约束, 因而在大陆再造研究过程中, 越来越受到重视(Lightfoot et al., 1997; Irvine, 1975; Keays, 1995; Wendlandt, 1982; 李文渊, 2004; 徐德明等, 2006)。440 Ma 左右的年龄, 与加

里东中晚期祁连造山带火山弧或弧后盆地的裂解时代接近(汤中立等, 2006), 可代表加里东运动俯冲碰撞后火山弧的裂解拉张的形成时限, 因而对加里东中晚期在祁连地区的构造运动表现形式及造山作用过程的细节及其时限是一种很好的约束(Li et al., 2008; Wang et al., 2006a)。岩体岩石地球化学、稀土元素、微量元素特征说明岩体母岩浆至少是两种端元的混合, 并遭受了陆壳物质混染作用。岩体的岩石地球化学特征反映出与俯冲相关的地球化学特征(Irvine et al., 1975; 李锦轶等, 2006), 如 Nb、Ta、Ti 的亏损, 以及所有岩石均属于钙碱性系列等, 且轻稀土(LREE)和大离子亲石元素(LILE)相对富集, 适度亏损高场强元素, 应属于碰撞岛弧环境中岩浆系统(Wang et al., 2006b; Ebel et al., 1996)。随着祁连地块向华北克拉通俯冲的进行, 于 450 Ma 北祁连闭合形成缝合带, 同时柴达木地块向北俯冲, 也于该时期在柴北缘形成高压超高压变质带(宋述光等, 2009)。而拉脊山有限小洋盆因俯冲挤压被迫闭合, 形成北祁连-中祁连-南祁连-西秦岭等的由南向北的俯冲拼贴状貌, 同时产生了岛弧岩浆作用, 产生了化隆一带基性-超基性杂岩体的就位。设想在复杂的地质作用过程中, 地壳深处岩浆物质, 沿着地层构造的层间裂隙, 间歇性压滤侵位, 形成了一些规模极小, 点滴状、扁豆状排列无规律的基性-超基性岩体(宋谢炎等, 2009)。并在此过程中, 由于岩浆自身性质和演化作用, 并遭受上地壳物质混染, 发生了硫化物的不混溶, Ni 等金属进入硫化物液相, 随着硫化物的聚集形成矿床。

4 结论

(1) 亚曲岩体为一铁质系列的基性杂岩体, 岩体分异好, 有用元素 Ni、Cu、Co 丰度高, 是个有利成矿的岩体; (2) 利用 ID-TIMS 方法首次获得亚曲岩体的精确年龄为 (440.74 ± 0.33) Ma, 亦是化隆基性-超基性岩带上获得的首例基性岩体的精确年龄。发育在化隆古老微陆块中的亚曲等铜镍矿化岩体, 形成于志留纪, 可能与祁连山及其邻区 460~440 Ma 时期俯冲向碰撞转换的作用有关, 是俯冲构造事件的岩浆活动和成矿作用在南祁连造山带的反映。

致谢: 衷心感谢中国地质科学院矿产资源研究所李延河研究员、侯可军副研究员对论文提出的建设性意见! 在数据测试中得到了美国印第安纳大学李楚思教授的有益帮助, 另外, 审稿人提出了具体修改建议, 谨此表示谢意!

参考文献:

- 陈隽璐, 何世平, 王洪亮. 2006. 秦岭-祁连造山带接合部位基性岩墙的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(6): 455-462.
- 樊光明, 雷东宁. 2007. 祁连山东南段加里东造山期构造变形年代的精确限定及其意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 32(1): 39-44.
- 高永宝, 李文渊, 张照伟, 李超, 周利敏, 郭周平, 张江伟, 李侃, 钱兵, 王亚磊, 谭文娟. 2012. 南祁连裕龙沟铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素物质来源示踪研究[J]. 地球学报, 33(6): 899-906.
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 徐学义, 张宏飞, 任光明, 余吉远. 2008. 中祁连马衔山岩群内基性岩墙群锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义[J]. 地球科学, 33(1): 35-45.
- 李锦轶, 宋彪, 王克卓, 李亚萍, 孙桂华, 齐得义. 2006. 东天山吐哈盆地南缘二叠纪幔源岩浆杂岩: 中亚地区陆壳垂向生长的地质记录[J]. 地球学报, 27(5): 424-446.
- 李文渊. 1996. 中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学[M]. 西安: 西安地图出版社.
- 李文渊. 2004. 祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析[J]. 地球学报, 25(3): 313-320.
- 李文渊. 2006. 祁连山岩浆作用有关金属硫化物矿床成矿与找矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘应汉. 2003. 青海拉水峡铜镍矿纳米物质地球化学异常特征及找矿模型[J]. 地质与勘探, 39(2): 11-15.
- 吕林素, 毛景文, 刘珏, 张作衡, 谢桂青. 2007. 华北克拉通北缘岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床地质特征、形成时代及其地球动力学背景[J]. 地球学报, 28(2): 148-166.
- 钱壮志, 王建中, 姜常义, 焦建刚, 闫海卿, 何克, 孙涛. 2009. 喀拉通克铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其成矿作用意义[J]. 岩石学报, 25(4): 832-844.
- 申勇胜, 马小红, 张玉洁, 延立波, 汪明启. 2009. 青海省化隆县拉水峡铜镍矿区地气汞气测量异常特征分析[J]. 黄金科学技术, 17(4): 54-57.
- 宋述光, 牛耀龄, 张立飞, 张贵宾. 2009. 大陆造山运动: 从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限——以北祁连山、柴北缘为例[J]. 岩石学报, 25(9): 2067-2077.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 2009. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义[J]. 地学前缘, 16(4): 287-305.
- 孙涛, 钱壮志, 汤中立, 刘民武, 高萍, 张江江, 张瑞, 姜超. 2012. 东天山四顶黑山层状岩体地质特征及成矿潜力分析[J]. 地球学报, 33(1): 38-48.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社: 117-125.

- 汤中立, 任端进. 1987. 中国硫化镍矿床类型及成矿模式[J]. 地质学报, (4): 350-360.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 李小虎. 2006. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. 矿床地质, 25(1): 1-9.
- 王登红, 骆耀南, 傅德明, 楚萤石, 卢治安. 2001. 四川杨柳坪 Cu-Ni-PGE 矿区基性-超基性岩的地球化学特征及其含矿性[J]. 地球学报, 22(2): 135-140.
- 王团华, 谢桂青, 叶安旺, 李宗彦. 2009. 豫西小秦岭-熊耳山区金矿成矿物质来源研究——兼论中基性岩墙与金成矿作用关系[J]. 地球学报, 30(1): 27-38.
- 徐德明, 谢才富, 张业明, 付太安, 李志宏. 2006. 琼中古-中元古代变基性火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地球学报, 27(3): 227-234.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 何立新, 何永胜, 周刚. 2003. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. 岩石矿物学杂志, 22(3): 217-224.
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 郭周平, 谭文娟, 姜寒冰. 2009. 南祁连隆微地块铜镍成矿地质条件及找矿方向[J]. 地质学报, 83(10): 1483-1489.
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 张江伟, 郭周平, 李侃. 2011. 青海省化隆县下什岩岩体地质-地球化学特征及其含矿性研究[J]. 大地构造与成矿学, 35(4): 596-602.
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 张江伟, 郭周平, 李侃, 张利忠. 2012a. 青海化隆基性-超基性岩带铜镍矿成矿条件与找矿潜力[J]. 西北地质, 45(1): 140-148.
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 张江伟, 郭周平, 李侃. 2012b. 南祁连裕龙沟岩体 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 31(2-3): 455-462.
- 赵恒川, 汪明启, 李明奎. 2007. 拉水峡铜镍矿地气异常特征及其意义[J]. 青海科技, (6): 28-33.
- Cosmochimica Acta, 57(9): 2001-2018.
- CAMPBELL I H, NALDRETT A J. 1979. The influence of silicate: sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides[J]. Economic Geology, 74(6): 1503-1506.
- CHEN Jun-lu, HE Shi-ping, WANG Hong-liang. 2006. Zircon LA-ICPMS U-Pb age of mafic dykes in the area between the Qinling and the Qilian orogenic belts and its geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(6): 455-462(in Chinese with English abstract).
- DEPAOLO D J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization[J]. Earth and Planetary Science Letters, 53(2): 189-202.
- EBEL D S, NALDRETT A J. 1996. Fractional crystallization of sulfide ore liquids at high temperature[J]. Economic Geology, 191(3): 607-637.
- FAN Guang-ming, LEI Dong-ning. 2007. Precise Timing and Significance of Caledonian Structural Deformation Chronology in Southeast Qilian[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 32(1): 39-44(in Chinese with English abstract).
- GAO Yong-bao, LI Wen-yuan, ZHANG Zhao-wei, LI Chao, ZHOU Li-min, GUO Zhou-ping, ZHANG Jiang-wei, LI Kan, QIAN Bing, WANG Ya-lei, TAN Wen-juan. 2012. Re-Os Isotopic Analysis of the Yulonggou Cu-Ni Sulfide Deposit in the South Qilian Mountain [J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(6): 899-906(in Chinese with English abstract).
- HE Shi-ping, WANG Hong-liang, CHEN Jun-lu, XU Xue-yi, ZHANG Hong-fei, REN Guang-ming, YU Ji-yuan. 2008. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology of Basic Dikes within Maxianshan Rock Group in the Central Qilian Mountains and Its Tectonic Implications[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 33(1): 35-45(in Chinese with English abstract).
- IRVINE T N. 1975. Crystallisation sequence of the Muskox Intrusion and other layered intrusions: II Origin of the chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 39: 991-1020.
- KEAYS R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and saturation in the formation of ore deposits[J]. Lithos, 34: 1-18.
- KROGH T E. 1973. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 37(3): 485-494.
- LI C, EDWARD M R, THOMAS O, OBERTHÜR T, MILLER J D,

References:

- JOSLIN G D. 2008. Textural, mineralogical and stable isotope studies of hydrothermal alteration in the main sulfide zone of the Great Dyke, Zimbabwe and the precious metals zone of the Sonju Lake Intrusion, Minnesota, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 43(1): 97-110.
- LI Jin-yi, SONG Biao, WANG Ke-zhuo, LI Ya-ping, SUN Gui-hua, QI De-yi. 2006. Permian mafic-ultramafic complexes on the South margin of the Tu-Ha basin, East Tianshan mountains: Geological records of vertical crustal growth in Central Asia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(5): 424-446(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-yuan. 1996. Metallogenic series and geochemistry of Ni-Cu sulfide deposits in China[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House(in Chinese).
- LI Wen-yuan. 2004. Main Mineral Deposit Associations in the Qilian Mountains and Their Metallogenic Dynamics[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(3): 313-320(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-yuan. 2006. Mineralization and prospecting of the metal sulphide deposits related to magmatism in Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LIGHTFOOD P C, HAWKESWORTH C J, HERGT J, NALDRETT A J, GORBACHEV N S, FEDORENKO V A, DOHERTY W. 1993. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major, trace element and Sr, Nd, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114(2): 171-188.
- LIGHTFOOD P C, HAWKESWORTH C J. 1997. Flood basalts and magmatic Ni, Cu, and PGE sulphide mineralization: comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Traps) and West Greenland sequences[C]//MAHONEY J. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. Geophysical Monograph 100, American Geophysical Union: 357-380.
- LIU Ying-han. 2003. The Anomalous Characteristic and the Mode for Prospecting Ores of the Nanoscale Material Geochemical Measurement in Lashuixia Ni-Cu Deposit in Qihai[J]. *Geology and Prospecting*, 39(2): 11-15(in Chinese).
- LÜ Lin-su, MAO Jing-wen, LIU Jun, ZHANG Zuo-heng, XIE Gui-qing. 2007. Geological Characteristics, Geochronology and Tectonic Settings of Typical Magmatic Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposits in the Northern Margin of the North China Craton[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 28(2): 148-166(in Chinese with English abstract).
- MCDONOUGH W F, SUN S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223-253.
- MCKENZIE D, BICKLE M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere[J]. *Journal of Petrology*, 29(3): 53-72.
- NALDRETT A J, LIGHTFOOT P C, FEDORENKO V A. 1993. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk Region, USSR, with implications for origin of the Ni-Cu ores[J]. *Economic Geologists*, 87(4): 975-1004.
- QIAN Zhuang-zhi, WANG Jian-zhong, JIANG Chang-yi, JIAO Jian-gang, YAN Hai-qing, HE Ke, SUN Tao. 2009. Geochemistry characters of platinum-group elements and its significances on the process of mineralization in the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 832-844(in Chinese with English abstract).
- RAD'KO V V. 1991. Model of dynamic differentiation of intrusive traps in the northwestern Siberian platform, Soviet [J]. *Geology and Geophysics*, 32(7): 70-77.
- SHEN Yong-sheng, MA Xiao-hong, ZHANG Yu-jie, YAN Li-bo, WABG Ming-qi. 2009. Discussion on the Anomaly Characteristics of Lashuixia Cu-Ni Deposit in Qinghai by Geogas and Mercury Gas Measurement[J]. *Gold Science and Technology*, 17(4): 54-57(in Chinese with English abstract).
- SONG Shu-guang, NIU Yao-ling, ZHANG Li-fei, ZHANG Gui-bin. 2009. Time constraints on orogenesis from oceanic subduction to continental subduction, collision and exhumation: An example from North Qilian and North Qaidam HP-UHP belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2067-2077(in Chinese with English abstract).
- SONG Xie-yan, HU Rui-zhong, CHEN Lie-meng. 2009. Geochemical natures of copper, nickel and PGE and their significance for the study of origin and evolution of mantle-derived magmas and magmatic sulfide deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 287-305(in Chinese with English abstract).
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotope systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes[M]//SAUNDERS A D, NORRIS M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publications, 42(1): 313-345.
- SUN Tao, QIAN Zhuang-zhi, TANG Zhong-li, LIU Min-wu, GAO Ping, ZHANG Jiang-jiang, ZHANG Rui, JIANG Chao. 2012.

- Geological Characteristics and Ore-forming Potential of Sid-ingheishan Stratified Mafic-ultramafic Intrusion in East Tian-shan Mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(1): 38-48(in Chinese with English abstract).
- TANG Zhong-li, LI Wen-yuan. 1995. Metallogenic model and Geological Correlation of Ni-Cu(PGE) sulfide deposit in Jinchuan[M]. Beijing: Geological Publishing House: 117-125(in Chinese).
- TANG Zhong-li, REN Duan-jin. 1987. Types and metallogenetic models of Nickel sulfide deposits in China[J]. *Acta Geological Sinica*, (4): 350-360(in Chinese with English abstract).
- TANG Zhong-li, YAN Hai-qing, JIAO Jian-gang, LI Xiao-hu. 2006. New classification of magmatic sulfide deposits in China and ore-forming processes of small intrusive bodies[J]. *Mineral Deposits*, 25(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution[M]. London: Blackwell Scientific Publications.
- WANG C Y, ZHOU M F, REID R K. 2006a. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China[J]. *Contributions to Mineralogy of Petrology*, 152(3): 309-321.
- WANG C Y, ZHOU M F. 2006b. Genesis of the Permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Yunnan, SW China[J]. *Miner Deposita*, 41(8): 771-783.
- WANG Deng-hong, LUO Yao-nan, FU De-min, CHU Ying-shi, LU Zhi-an. 2001. Petrochemistry and Ore Potentiality of the mafic-ultramafic rocks in the Yangliuping Cu-Ni-PGf mine, Sichuan Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(2): 135-140(in Chinese with English abstract).
- WANG Tuan-hua, XIE Gui-qing, YE An-wang, LI Zong-yan. 2009. Material Sources of Gold Deposits in Xiao-qinling-Xiong'ershan Area of Western Henan Province as well as the Relationship between Gold Deposits and Intermediate-Basic Dykes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(1): 27-38(in Chinese with English abstract).
- WENDLANDT R F. 1982. Sulphide saturation of basalts and andesite melts at high pressures and temperatures[J]. *American Mineralogist*, 67(9-10): 877-885.
- XU De-ming, XIE Cai-fu, ZHANG Ye-ming, FU Tai-an, LI Zhi-hong. 2006. Geochemical Characteristics of the Paleo-Mesoproterozoic Meta-Basic Volcanics in Qiongzong, Hainan Island, and Their Geological Implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(3): 227-234(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhao-chong, YAN Sheng-hao, CHEN Bai-lin, HE Li-xin, HE Yong-sheng, ZHOU Gang. 2003. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 217-224(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhao-wei, LI Wen-yuan, GAO Yong-bao, GUO Zhou-ping, TAN Wen-juan, JIANG Han-bing. 2009. Metallogenic Geological Conditions of Hualong Dome-Like Massif, South Qilian Mountain and Prospecting Direction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1483-1489(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhao-wei, LI Wen-yuan, GAO Yong-bao, ZHANG Ji-ang-wei, GUO Zhou-ping, LI Kan. 2011. Geology and Geochemistry Characteristics and Ore-bearing Potential of the Xi-ashentang Intrusive Rocks in Hualong County, Qinghai Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(4): 596-602(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhao-wei, LI Wen-yuan, GAO Yong-bao, ZHANG Ji-ang-wei, GUO Zhou-ping, LI Kan, ZHANG Li-zhong. 2012a. Ni-Cu Mineralization Conditions of Hualong Basic-Ultrabasic Rocks Belt in Qinghai Province and its Prospecting Potentiality[J]. *Northwestern Geology*, 45(1): 140-148(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhao-wei, LI Wen-yuan, GAO Yong-bao, ZHANG Ji-ang-wei, GUO Zhou-ping, LI Kan. 2012b. ID-TIMS zircon U-Pb age of Yulonggou intrusive rocks in Southern Qilian Mountains and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2-3): 455-462(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Heng-chuan, WANG Ming-qi, LI Ming-kui. 2007. The Geogas anomaly characteristic and its signification in Lashuixia Ni-Cu Deposit in Qihai[J]. *Qinghai Science and Technology*, (6): 28-33(in Chinese).