

## 青海赛什塘铜矿区侵入岩体地球化学及 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学

刘建平<sup>1,2</sup>, 赖健清<sup>1,2</sup>, 谷湘平<sup>1,2</sup>, 王雄军<sup>1,2</sup>, 毛寅<sup>1,2</sup>, 宋文彬<sup>1,2</sup>

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

**摘要:** 位于青海东部的鄂拉山地区是青藏高原北部重要的构造-岩浆-成矿带。为探讨该区岩浆岩-成矿作用, 选取赛什塘铜矿区石英闪长玢岩和花岗斑岩开展了岩石主量元素、微量元素和锆石 U-Pb LA-ICPMS 测试。主量元素结果显示: 赛什塘铜矿区杂岩体的石英闪长玢岩和花岗斑岩属于偏铝质岩石, 具 I 型花岗岩的特征, 岩石系列属于高钾钙碱性系列。岩石具弱或无 Eu 异常, 石英闪长岩和花岗斑岩具相似的微量元素特征, 稀土元素配分模式一致, 具轻稀土富集、重稀土亏损、富集大离子亲石元素和亏损高场强元素特点。矿区岩体锆石阴极发光照相显示: 锆石全部具环带结构, 显示岩浆锆石特征。锆石 U-Pb 年代学显示石英闪长玢岩具岩浆环带锆石的 27 个测试点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(223.2\pm 2.2)$  Ma (MSWD=0.82); 花岗斑岩具岩浆环带锆石的 21 个测试点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(219.9\pm 2.6)$  Ma (MSWD=0.89)。因此, 岩体形成于 220 Ma 左右, 为印支晚期岩石圈拆沉作用产生壳-幔混合岩浆的产物。

**关键词:** 地球化学; 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学; 侵入岩体; 赛什塘铜矿区; 青海省  
中图分类号: P597<sup>+1</sup> 文献标志码: A

## Geochemistry and zircon LA-ICPMS U-Pb geochronology of intrusive body in Saishitang copper deposit, Qinghai Province, China

LIU Jian-ping<sup>1,2</sup>, LAI Jian-qing<sup>1,2</sup>, GU Xiang-ping<sup>1,2</sup>, WANG Xiong-jun<sup>1,2</sup>, MAO Yin<sup>1,2</sup>, SONG Wen-bin<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The Ela Mountain in the east of Qinghai Province is one of the important structural-magmatic- metallogenetic belts of northern Tibet. In order to discuss the magmatic mineralization in the area, quartz diorite porphyry and granite-porphyry in the Saishitang polymetallic deposit were selected; whole-rock major and trace elements and zircon U-Pb LA-ICPMS ages were analyzed. Geochemically, they both belong to high-potassium calc-alkalic rock series, with no or weak Eu anomaly, and enrichment of LREE, LILE and depletion of HREE, HFSE. The cathodoluminescence images of zircon of intrusive rocks show all that the zircons are magmatic zircons which have zonal structure. The dating of LA-ICP-MS zircon U-Pb of two samples shows that 27 points of oscillatory zoned domains of quartz diorite porphyry sample yield a group of weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages at  $(223.2\pm 2.2)$  Ma (MSWD=0.82) and 21 points of oscillatory zoned domains of granite-porphyry sample yield a group of weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages at  $(219.9\pm 2.6)$  Ma (MSWD=0.89). The intrusive rocks were formed about 220 Ma, resulted from lithospheric delamination after crustal thickening due to collision between continental plates in late Indosinian.

**Key words:** geochemistry; zircon LA-ICPMS U-Pb geochronology; intrusive body; Saishitang copper deposit; Qinghai Province

基金项目: 全国危机矿山接替资源找矿专项项目(20089942); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011QNZT008); 中南大学博士后科研基金和有色金属成矿预测教育部重点实验室开放基金资助项目

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-01-04

通信作者: 刘建平, 博士; 电话: 15200934981; E-mail: liujianping303@163.com

东昆仑造山带是青藏高原内可与冈底斯相媲美的一条巨型构造岩浆岩带<sup>[1]</sup>。该构造岩浆岩是研究特提斯洋北部演化及地壳演化的天然实验室。前人对该区花岗岩开展了大量的研究工作<sup>[2-5]</sup>。同时强烈的构造岩浆岩活动孕育了丰富的矿产资源, 是国内重要矿产勘查区<sup>[6-8]</sup>。然而, 位于东段的鄂拉山构造岩浆岩带为东昆仑与西秦岭结合部位, 构造极其复杂, 研究相对薄弱, 认识存在分歧<sup>[9]</sup>。更为重要的是该区广泛发育的铜多金属矿化, 产有赛什塘中型铜矿<sup>[10]</sup>、铜峪沟大型铜多金属矿和日龙沟中型锡多金属矿等著名的大中型矿床, 成为青海乃至全国重要的铜矿集区<sup>[7, 11]</sup>。区内成矿作用丰富, 已识别出热水沉积成矿作用、接触交代型成矿作用和斑岩型矿床成矿作用。随着研究的深入, 中酸性成矿作用及斑岩型矿床找矿成为新的热点<sup>[11-15]</sup>。20 世纪 70 年代以来, 人们采用各类方法对赛什塘矿区不同岩性开展了年代学工作<sup>[10-11, 13-14]</sup>获得侵入岩年龄在 205~248 Ma。但该结果时间跨度大, 缺乏矿区侵入岩精确时代, 制约了对该区岩浆岩的成矿作用的认识。本文作者选择赛什塘矿区侵入岩的石英闪长玢岩及花岗斑岩开展了地球化学及锆石 U-Pb LA-ICPMS 年代学研究, 并探讨了成岩动力学背景。

## 1 区域地质背景

鄂拉山构造-岩浆带呈北北西-南南东向展布, 以哇洪山-温泉断裂界以西为柴达木地块相邻, 区域上在早二叠世拉张成为裂谷盆地<sup>[11]</sup>, 早、中三叠世盆地达到最大, 接受 5~10 km 的砂岩、板岩组成的复理石沉积。在鄂拉山地区, 下三叠统(隆务河群)和中三叠统超过 20 km, 在中三叠统上部出现火山-沉积岩。中三叠世晚期裂谷盆地进入造山阶段, 发育陆相中心式喷发为主的石英安山岩+流纹岩组成的火山岩<sup>[11]</sup>, 上部以流纹质粗碎屑岩沉积岩为主。晚三叠世发育大量的花岗岩类侵入, 主要包括石英闪长岩、花岗闪长岩-花岗岩两类组合。区域构造上最显著的断裂是哇洪山断裂, 盆地裂陷期为同生张断裂, 造山期转为俯冲、走滑断层。区内矿产资源丰富, 从北到南发育有众多以铜为主的多金属矿床、矿点, 北段有什么龙铅锌矿床, 中南段有索拉沟铜多金属矿床、日龙沟锡多金属矿床、铜峪沟铜多金属矿、赛什塘中型铜矿和杂科含铜银砷矿床等。区内成矿作用多样, 矿种类型丰富。

## 2 矿区地质及岩体特征

赛什塘矿区出露地层有中、下三叠统浅变质千枚岩、砂岩和大理岩, 第三系紫红色砂砾岩和第四系松散堆积物。关于该地层时代尚有争议, 早期工作认为属早二叠世, 后来矿区地层化石鉴定认为属早-中三叠世<sup>[13]</sup>。矿区构造发育, 见雪青沟复式背斜及其次级赛什塘背斜, 发育多组断裂, 主要有北西向和近东西向, 断裂规模不等。岩浆岩主体为石英闪长岩体和花岗斑岩体。矿体主要产自岩体边部及地层中, 地表见矽卡岩化。矿区矿化复杂, 矿种以铜为主, 伴生铅、锌、金、银、锡、铁和硫等。矿体似层状和透镜状, 走向及倾向上分枝复合现象明显, 矿床规模达到中型。

矿区侵入岩为一套中酸性为主的中深成相-浅成相-超浅成相多次侵入的杂岩体<sup>[10]</sup>。根据岩性特征及穿插关系, 划分出 5 个侵入阶段: 第 1 阶段以脉形式产出的闪长玢岩; 第 2 阶段为中粒闪长岩(I 号岩体); 第 3 阶段为细粒石英闪长玢岩、斜长花岗斑岩和花岗闪长岩斑岩(II 号岩体); 第 4 阶段为以岩脉形式产出的石英闪长玢岩; 第 5 阶段为以岩脉形式产出的花岗闪长岩、花岗斑岩、英安岩及次流纹质岩石等。主岩体(石英闪长岩)呈岩株状分布在雪青背斜南西翼, 呈北西向展布(见图 1)。岩体南高北低, 向北西倾伏, 形态复杂, 分支明显, 多为顺层贯入。岩体东西两侧分别向围岩倾斜, 北西陡, 南西缓。岩体大致可以分为 3 个岩相: 内部相中粒石英闪长岩, 过度相细粒石英闪长岩, 边缘相带中见围岩捕虏体和同化混染现象, 岩相随围岩性质不同而不同, 以闪长玢岩和石英闪长玢岩为主, 其次为辉石闪长玢岩和花岗闪长斑岩<sup>[16]</sup>。

## 3 测试方法及结果

### 3.1 测试方法

本研究采集赛什塘矿区采集石英闪长玢岩(Sd-2-1, Sd-2-2, Sd-2-3, Sd-2-4, Sd-2-5)和花岗斑岩(Sg-1-1, Sg-1-2)7 件样品开展岩石地球化学分析。对两类岩石各取 1 件样品(样品号分别为 Sd-2, Sg-1)开展锆石 U-Pb 年代学研究。

采用 XRF 方法在中南大学地球科学与信息物理学院 X 荧光实验室对岩石主量元素进行测定, 分析仪器型号 ZSX Primus II, 精度高于 5%。微量元素采用

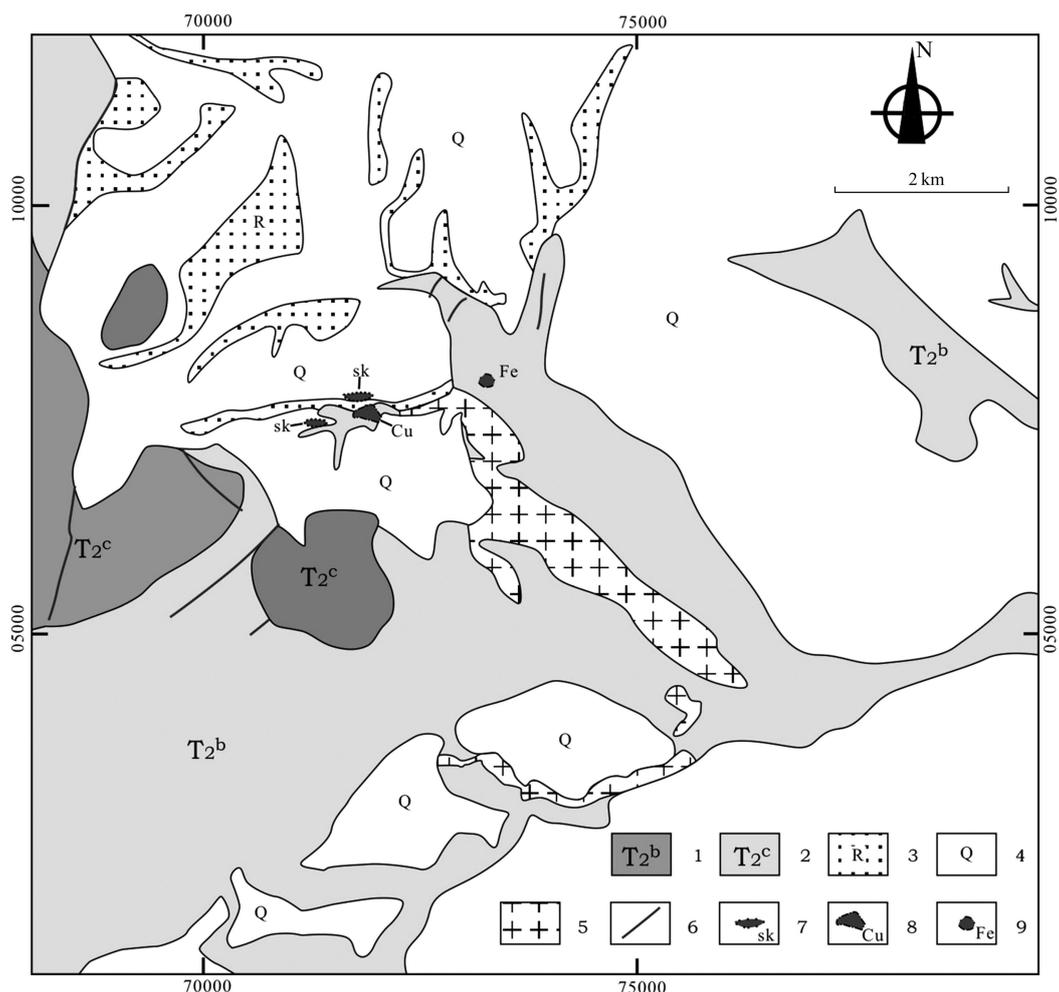


图1 青海赛什塘铜多金属矿区地质图<sup>[17]</sup>: 1—中三叠统 b 组; 2—中三叠统 c 组; 3—第三系紫红色砂岩; 4—第四系堆积物; 5—石英闪长岩岩体; 6—断裂; 7—矽卡岩; 8—铜矿体; 9—铁矿体

Fig. 1 Geological map of Saishitang copper multi-metal deposit, Qinghai Province, China<sup>[17]</sup>: 1—Middle Triassic b group; 2—Middle Triassic c group; 3—Tertiary red sandstones; 4—Quaternary deposits; 5—Quartz diorite porphyrite; 6—Faults; 7—Skarn; 8—Copper orebody; 9—Iron orebody

ICP-MS(ELEMENT 型)等离子体质谱仪在中国科学院地球化学研究所完成, 精度高于 10%。

对石英闪长玢岩(Sd-2)和花岗岩岩(Sg-1)两件大样开展锆石分选及年代学测试。采用常规方法将样品破碎, 经浮选和磁选后, 再在双目镜下选择透明、无裂隙、无明显包裹体且具代表性的锆石。将待测的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶, 并抛光至锆石出露 1/2 左右。锆石 U-Pb 年龄测定前, 详细研究待测定锆石的透、反射光图像及阴极发光(CL)图像, 并选择合适的同位素分析点。锆石的阴极发光(CL)显微结构照相在中国地质科学院矿产资源所 JEOL JXA-8900RL 型电子探针上完成。

锆石 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 同位素年龄分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验

室完成。测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪(Agilent7500a)和准分子激光剥蚀系统(GeoLas2005)联机, 激光器为 193 nm ArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 32  $\mu\text{m}$ , 激光剥蚀样品的深度为 20~40  $\mu\text{m}$ 。实验中, 采用 He 作为剥蚀物质的载气。锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标、NIST610 作为内标, 分析方法及仪器参数见文献[18], 采用 ICPMS DataCa<sup>[19]</sup>进行数据处理。采用 Andersen<sup>[20]</sup>方法对普通 Pb 进行校正, 并采用 ISOPLOT 程序<sup>[21]</sup>计算锆石加权平均年龄及绘制谐和图。

### 3.2 地球化学特征

岩石主量、微量和稀土元素分析结果见表 1。由表 1 可知, 矿区石英闪长岩 SiO<sub>2</sub> 的含量(质量分数)为

表1 青海赛什塘铜矿区岩体岩石主量元素(w, %)、微量元素(w, 10<sup>-6</sup>)和稀土元素(w, 10<sup>-6</sup>)测试结果

Table 1 Compositions of major elements and trace elements of intrusive rock in Saishitang copper deposit, Qinghai Province

样号	Sg-1-1	Sg-1-2	Sd-2-1	Sd-2-2	Sd-2-3	Sd-2-4	Sd-2-5
岩性	花岗斑岩	花岗斑岩	石英闪长玢岩	石英闪长玢岩	石英闪长玢岩	石英闪长玢岩	石英闪长玢岩
SiO <sub>2</sub>	67.56	68.69	57.86	60.33	62.03	62.84	59.17
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.37	0.50	0.53	0.52	0.50	0.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.73	15.59	15.12	15.89	15.96	16.00	15.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.06	2.72	6.31	4.90	4.48	4.11	5.77
MnO	0.03	0.03	0.13	0.10	0.08	0.06	0.13
MgO	1.42	1.30	5.43	4.19	3.51	3.41	5.08
CaO	3.05	2.84	5.82	5.18	4.69	4.50	5.50
Na <sub>2</sub> O	2.88	2.75	1.66	2.09	2.11	2.15	1.80
K <sub>2</sub> O	3.89	3.89	3.24	3.42	3.83	4.20	3.51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.09	0.09	0.11	0.11	0.11	0.10
LOI	1.23	1.42	3.14	2.73	2.50	2.08	3.13
Sum	99.33	99.70	99.31	99.46	99.84	99.95	100.43
A/CNK	1.09	1.12	0.90	0.96	0.99	0.98	0.94
Sc	7.0	7.9	18.8	15.5	13.7	13.3	17.3
V	36.9	36.5	122.0	96.8	82.6	80.8	113.0
Cr	16	20	248	162	127	121	211
Co	40.1	45.5	24.8	22.8	22.9	22.9	23.4
Ni	18.4	21.4	64.4	47.2	39.6	36.8	56.9
Cu	292.6	289.2	12.6	64.8	45.1	34.3	19.1
Zn	60.6	64.9	99.0	77.4	82.6	71.0	91.8
Ga	17.4	17.1	17.8	18.7	19.2	18.3	17.7
Ge	1.21	1.22	1.82	1.60	1.55	1.57	1.63
Cs	6.7	6.7	21.4	22.4	20.9	20.9	21.8
Rb	126	125	166	163	179	195	169
Ba	711	669	516	601	733	739	557
Th	12.8	14.1	7.4	8.5	10.0	10.1	7.5
U	5.05	5.33	2.70	2.99	3.51	3.44	2.71
Nb	11.8	12.0	8.0	9.6	10.6	10.6	8.2
Ta	1.96	2.13	1.01	1.12	1.26	1.21	0.97
La	25.2	26.5	18.0	23.2	24.9	26.7	20.3
Ce	46.3	49.6	35.1	43	47.4	50.1	38.1
Pb	12.2	12.3	7.72	8.08	8.02	8.23	8.49
Pr	4.97	5.36	3.82	4.81	5.18	5.44	4.26
Sr	479	405	333	403	427	440	343
Nd	17.3	18.2	14.1	17.3	18.4	20.2	15.3
Zr	125	135	116	139	148	143	118
Hf	3.49	3.61	2.84	3.39	3.67	3.59	2.86
Sm	3.18	3.36	2.87	3.4	3.49	3.73	2.96
Eu	0.85	0.85	0.68	0.94	0.93	0.97	0.72
Gd	2.94	2.81	2.81	3.31	3.22	3.63	3.10
Tb	0.39	0.41	0.43	0.47	0.44	0.47	0.45
Dy	2.04	2.11	2.43	2.51	2.51	2.58	2.44
Y	12.6	12.9	15.1	15.2	14.9	14.8	14.8
Ho	0.42	0.45	0.53	0.52	0.53	0.53	0.55
Er	1.19	1.23	1.49	1.35	1.4	1.37	1.48
Tm	0.17	0.18	0.20	0.19	0.20	0.20	0.21
Yb	1.19	1.27	1.45	1.36	1.37	1.31	1.46
Lu	0.18	0.19	0.21	0.20	0.19	0.19	0.20
∑REE	106.32	112.51	84.13	102.56	110.16	117.42	91.54
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	15.19	14.97	8.90	12.24	13.04	14.62	9.97
δ(Eu)	0.85	0.84	0.73	0.86	0.85	0.80	0.73
δ(Ce)	1.01	1.02	1.04	1.00	1.02	1.02	1.00

57.86%~62.84%, TiO<sub>2</sub> 0.50%~0.53%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15.12%~16.00%, MnO 0.06%~0.13%, MgO 3.41%~5.43%, CaO 4.5%~5.82%, Na<sub>2</sub>O 1.66%~2.15%, K<sub>2</sub>O 3.24%~4.20%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.09%~0.11%, 平均 0.10%, 全碱 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 4.90%~6.35%; 而花岗斑岩的 SiO<sub>2</sub> 含量(质量分数)为 67.56%~68.69%, TiO<sub>2</sub> 0.37%~0.39%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15.59%~15.73%, MnO 0.03%, MgO 1.30%~1.42%, CaO 2.84%~3.05%, Na<sub>2</sub>O 2.75%~2.88%, K<sub>2</sub>O 3.89%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 0.09%, 全碱 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 为 6.64%~6.77%。赛什塘矿区石英闪长玢岩和花岗斑岩具有中等 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、富 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 及低 CaO 和 TiO<sub>2</sub> 的特点, 在 TAS 图解(见图 2(a))中, 石英闪长岩落入闪长岩区域, 花岗斑岩落入花岗闪长岩区域, 二者均显示偏铝质特点, A/CNK<1.1(见表 1 和图 2(b)), 具 I 型花岗岩的特点, 岩石系列落入属于高钾钙碱性系列(见图 3)。

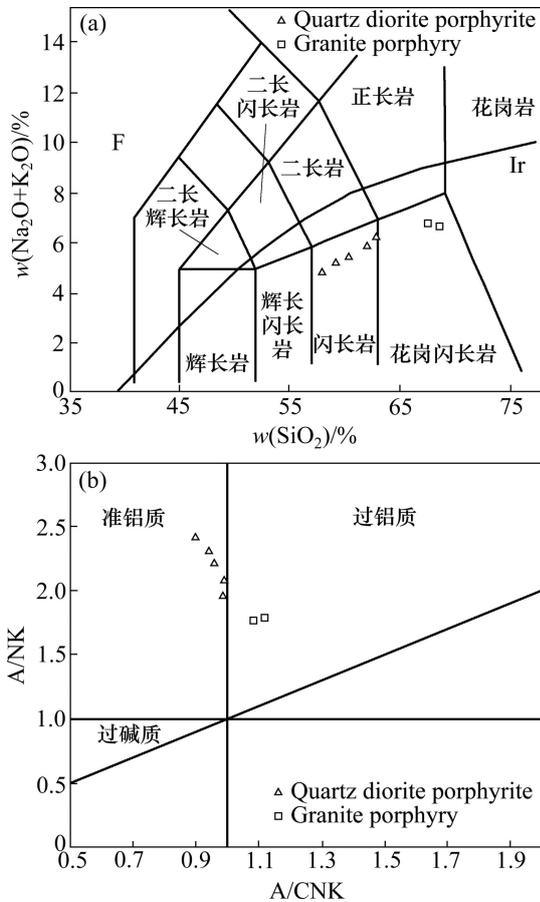


图 2 赛什塘矿区岩体 TAS 图解<sup>[22]</sup>(a)和 A/NK—A/CNK 图解<sup>[23]</sup>(b) of intrusion in Saishitang deposit

石英闪长玢岩稀土总量 $\sum REE$  在  $84.13 \times 10^{-6}$ ~ $117.42 \times 10^{-6}$ 之间, 与花岗斑岩稀土总量 $\sum REE$   $106.32 \times 10^{-6}$ ~ $112.51 \times 10^{-6}$  相当(见表 1)。石英闪长玢岩的

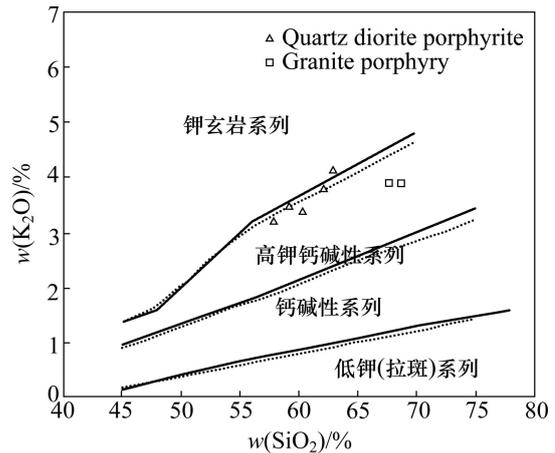


图 3  $w(K_2O)$ — $w(SiO_2)$ 图解<sup>[24]</sup>  
Fig. 3  $w(K_2O)$ — $w(SiO_2)$  diagram of intrusion in Saishitang deposit<sup>[24]</sup>

La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 值(8.90~14.62)与花岗斑岩的(14.97~15.19)相一致, 表明岩石轻/重稀土分馏明显, 石英闪长岩和花岗斑岩的弱 Eu 异常甚至无 Eu 异常(见表 1 和图 4(a)), 表明在岩浆形成的矿物-熔浆平衡系统中很少有斜长石矿物的参与, 从稀土配分模式图(见图 4(b))可以看出, 花岗斑岩和石英闪长玢岩均为右倾轻稀土富集型, HREE 总体呈平坦配分模式。这些特征表明两岩性属于同一岩浆演化的产物。

由图 4(b)可以看出, 石英闪长玢岩和花岗斑岩微量元素配分模式趋势一致, 富集大离子亲石元素(LILE), 如 Rb、K 和 Pb 具有明显的正异常, 亏损高场强元素(HFSE)和重稀土元素, 显示 Nb 和 Ta 的负异常, 尤其亏损 P 和 Ti, 以上特点显示俯冲带岩浆地球化学类似特征<sup>[26]</sup>。

### 3.3 锆石 LA-ICPMS 年代学

赛什塘矿区石英闪长玢岩锆石较大, 选出的锆石完整, 锆石颗粒多为长柱状, 长为 100~300 μm, 个别达 400 μm, 绝大部分锆石具有环带结构(见图 5(a)), 少数具核边结构。为获得岩体成岩年龄, 对 29 颗锆石的边部进行了 LA-ICPMS 测试, 测试数据见表 2。锆石的 Th/U 比值为 0.23~0.50, 具岩浆锆石的特点。测点中除点 4、8 和 23 锆石数据谐和度低外, 其余 27 点 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄在 211~236 Ma 之间, 多数集中在 220 Ma 左右, 这些点几乎全部落在协和线上(见图 5(b)), 计算出 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为(223.2±2.2) Ma (MSWD=0.82, n=27)。

花岗斑岩锆石特征与石英闪长玢岩锆石具有相似特征, 多数锆石完整, 颗粒大小悬殊, 多为长柱状,

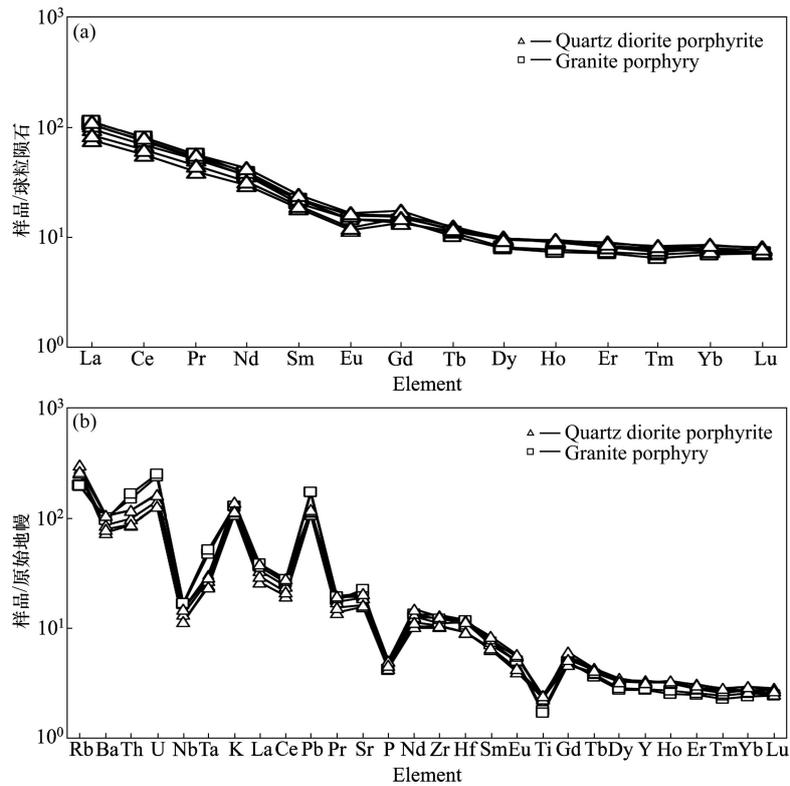


图 4 稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b)(标准化值据文献[25])

Fig. 4 REE distribution patterns normalized by chondrite (a) and trace elements distribution patterns normalized by primitive mantle (b) (Data of chondrite and primitive mantle from Ref. [25])

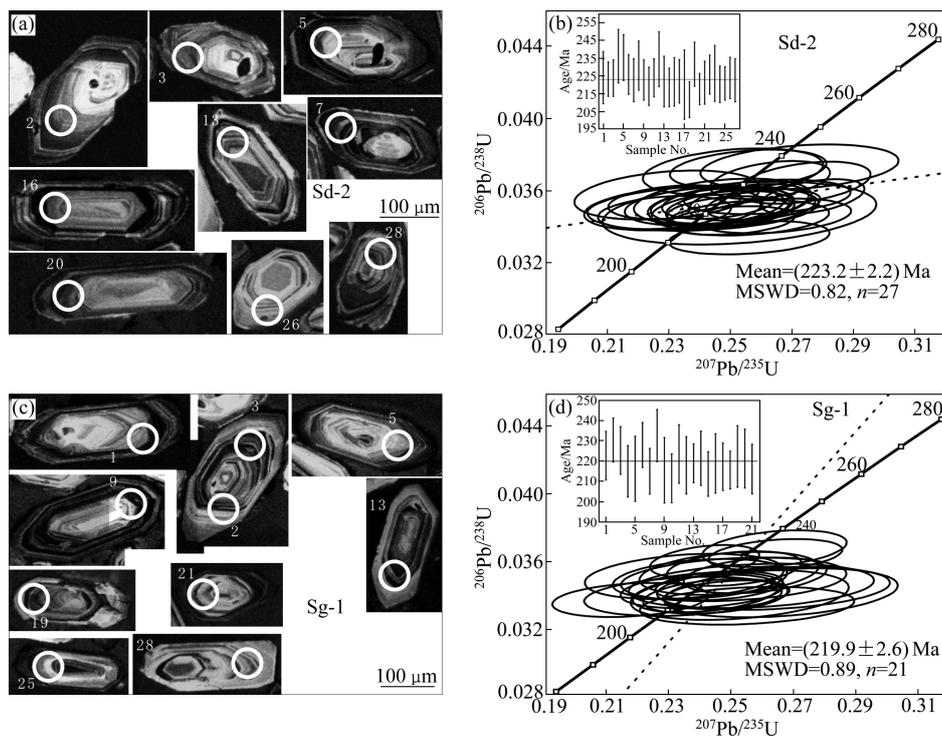


图 5 赛什塘矿区岩体锆石阴极发光图像和锆石 U-Pb 谐和图: (a) 石英闪长玢岩锆石阴极发光图像; (b) 石英闪长玢岩锆石 U-Pb 谐和图; (c) 花岗斑岩锆石阴极发光图像; (d) 花岗斑岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 CL images and zircon U-Pb concordia plots of intrusive rocks in Saishitang copper deposit: (a) Zircon CL images of quartz diorite porphyrite; (b) Zircon U-Pb concordia plot of quartz diorite porphyrite; (c) Zircon CL images of granite porphyry; (d) Zircon U-Pb concordia plot of granite porphyry

表2 青海赛什塘岩体石英闪长玢岩锆石 LA-ICPMS 测年结果

Table 2 Zircons LA-ICPMS U-Pb isotopic data of quartz diorite porphyrite in Saishitang copper deposit

测点号	w(Pb)/ 10 <sup>-6</sup>	w(Th)/ 10 <sup>-6</sup>	w(U)/ 10 <sup>-6</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
					Ratio	1σ	Ratio	1σ	Age/Ma	1σ	Age/Ma	1σ
1	6.22	61.37	153.30	0.40	0.247 5	0.011 8	0.035 4	0.000 5	224.5	10	224.1	3
2	15.86	137.26	395.68	0.35	0.260 6	0.007 6	0.035 2	0.000 3	235.1	6	223.3	2
3	17.27	191.81	421.31	0.46	0.246 5	0.007 7	0.035 3	0.000 4	223.7	6	223.9	2
4	50.90	370.50	1199.79	0.31	0.502 8	0.246 2	0.036 6	0.000 3	413.6	168	231.6	2
5	6.62	63.40	150.95	0.42	0.272 4	0.013 2	0.037 3	0.000 5	244.6	11	236.2	3
6	15.87	162.73	366.93	0.44	0.255 7	0.010 4	0.037 2	0.000 4	231.2	8	235.4	3
7	30.11	198.30	711.66	0.28	0.276 6	0.006 9	0.035 7	0.000 4	248.0	6	225.9	2
8	8.43	62.05	194.08	0.32	0.304 5	0.016 2	0.037 4	0.000 5	269.9	13	236.4	3
9	11.15	109.88	273.29	0.40	0.246 6	0.009 6	0.035 1	0.000 4	223.8	8	222.6	3
10	22.64	150.16	530.63	0.28	0.273 7	0.008 9	0.036 4	0.000 5	245.6	7	230.7	3
11	11.45	99.54	282.13	0.35	0.247 4	0.009 5	0.035 2	0.000 4	224.4	8	222.8	3
12	10.42	84.76	261.55	0.32	0.264 1	0.010 3	0.034 6	0.000 4	237.9	8	219.3	2
13	14.11	117.79	356.02	0.33	0.231 8	0.008 8	0.035 4	0.000 4	211.7	7	224.0	2
14	8.93	83.59	212.00	0.39	0.250 8	0.012 0	0.037 1	0.000 5	227.2	10	234.5	3
15	5.78	45.22	147.90	0.31	0.241 0	0.015 4	0.035 0	0.000 5	219.3	13	222.0	3
16	14.09	183.04	340.74	0.54	0.255 7	0.010 8	0.034 5	0.000 4	231.2	9	218.6	2
17	7.37	62.26	187.39	0.33	0.231 4	0.011 9	0.035 0	0.000 5	211.4	10	221.8	3
18	10.37	95.35	263.00	0.36	0.253 3	0.009 9	0.035 1	0.000 4	229.2	8	222.1	3
19	2.90	35.83	71.37	0.50	0.252 9	0.018 2	0.034 8	0.000 7	228.9	15	220.2	4
20	11.41	72.55	311.17	0.23	0.256 0	0.010 7	0.033 4	0.000 4	231.5	9	211.8	2
21	20.66	142.19	513.54	0.28	0.262 9	0.008 0	0.036 6	0.000 4	237.0	6	231.7	3
22	16.87	144.93	430.94	0.34	0.250 3	0.008 4	0.034 3	0.000 3	226.8	7	217.7	2
23	11.95	109.67	221.57	0.49	0.261 8	0.012 4	0.050 9	0.014 2	236.1	10	320.1	87
24	12.82	105.49	319.83	0.33	0.247 6	0.009 5	0.034 9	0.000 4	224.6	8	221.3	3
25	11.88	89.42	296.08	0.30	0.262 0	0.011 1	0.035 7	0.000 4	236.3	9	225.8	2
26	6.35	83.02	150.00	0.55	0.229 5	0.012 4	0.035 8	0.000 6	209.8	10	226.5	3
27	11.90	105.99	301.35	0.35	0.228 6	0.008 9	0.034 8	0.000 4	209.0	7	220.4	2
28	18.17	179.80	451.57	0.40	0.249 2	0.008 1	0.034 9	0.000 3	225.9	7	220.9	2
29	18.02	179.80	437.46	0.41	0.255 9	0.008 0	0.035 4	0.000 4	231.3	6	224.0	3
30	10.62	91.44	271.57	0.34	0.241 5	0.010 6	0.035 1	0.000 4	219.6	9	222.6	3

长宽比为 3:1, 绝大部分锆石具有环带结构(见图 5(c))。对选出的锆石 29 点进行 U-Pb LA-ICPMS 测试, 结果见表 3。锆石 Th/U 比值除个别大于 0.5 外, 其余为 0.28~0.50, 显示岩浆锆石特征。测点中点 4、6、7、13、14、17、20、29 共 8 点的谐和度低或部分含锆石含包体, 获得年龄可信度低外, 其余 21 点的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄在 214~233 Ma 之间, 多数集中在 220 Ma 左右,

全部落在协和线上(见图 5(d)), 计算出 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为(219.9±2.6) Ma (MSWD=0.89, n=21)。

## 4 讨论

### 4.1 岩浆岩形成时代

表 3 青海赛什塘花岗斑岩锆石 LA-ICPMS 测年结果

Table 3 Zircons LA-ICPMS U-Pb isotopic data of granite porphyry in Saishitang copper deposit

测点号	w(Pb)/ 10 <sup>-6</sup>	w(Th)/ 10 <sup>-6</sup>	w(U)/ 10 <sup>-6</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
					Ratio	1σ	Ratio	1σ	Age/Ma	1σ	Age/Ma	1σ
1	9.60	60.93	244.95	0.25	0.257 6	0.009 4	0.035 1	0.000 4	232.7	8	222.7	3
2	20.89	172.15	504.66	0.34	0.264 1	0.008 8	0.036 4	0.000 4	238.0	7	230.4	2
3	13.21	120.10	322.44	0.37	0.250 9	0.008 8	0.035 6	0.000 4	227.3	7	225.2	3
4	9.57	91.84	195.03	0.47	1.128 4	0.898 9	0.034 8	0.000 5	767.0	457	220.7	3
5	6.05	54.46	154.57	0.35	0.234 4	0.013 0	0.033 9	0.000 5	213.9	11	215.0	3
6	2.85	34.48	65.34	0.53	0.309 2	0.021 0	0.034 6	0.000 6	273.6	16	219.2	4
7	6.02	45.46	152.46	0.30	0.359 2	0.035 2	0.034 0	0.000 6	311.6	26	215.6	4
8	4.59	56.98	113.10	0.50	0.265 9	0.015 3	0.034 1	0.000 6	239.4	12	216.3	4
9	16.56	117.40	407.17	0.29	0.241 4	0.007 2	0.036 0	0.000 4	219.6	6	227.9	2
10	10.23	89.66	264.43	0.34	0.244 8	0.009 5	0.033 9	0.000 4	222.4	8	215.0	3
11	15.20	103.86	364.49	0.28	0.263 8	0.009 5	0.036 7	0.000 4	237.7	8	232.5	3
12	3.45	36.18	86.29	0.42	0.252 6	0.014 3	0.034 0	0.000 6	228.7	12	215.5	4
13	20.20	147.51	487.92	0.30	0.349 8	0.017 6	0.036 6	0.000 5	304.5	13	232.0	3
14	3.78	35.59	92.11	0.39	0.292 3	0.017 5	0.035 0	0.000 5	260.4	14	222.0	3
15	8.42	105.45	210.11	0.50	0.255 0	0.014 1	0.033 4	0.000 5	230.6	11	211.6	3
16	8.09	76.95	192.42	0.40	0.249 2	0.011 7	0.035 3	0.000 5	225.9	10	223.5	3
17	7.60	117.78	167.71	0.70	0.396 3	0.029 5	0.033 6	0.000 4	339.0	21	213.1	3
18	6.31	60.80	153.61	0.40	0.263 5	0.015 3	0.034 4	0.000 5	237.5	12	217.9	3
19	13.49	118.55	332.97	0.36	0.246 0	0.008 4	0.034 5	0.000 4	223.4	7	218.9	2
20	6.94	66.58	196.72	0.34	0.237 6	0.010 9	0.029 4	0.000 4	216.4	9	186.7	2
21	9.48	100.30	225.17	0.45	0.239 9	0.011 4	0.034 9	0.000 5	218.3	9	221.4	3
22	7.19	63.65	181.85	0.35	0.217 5	0.010 2	0.033 7	0.000 4	199.8	9	213.7	3
23	4.73	67.43	105.93	0.64	0.256 4	0.016 1	0.034 5	0.000 5	231.7	13	218.8	3
24	8.68	68.14	215.40	0.32	0.240 7	0.010 7	0.034 3	0.000 4	219.0	9	217.2	3
25	18.52	162.08	452.67	0.36	0.248 4	0.008 3	0.034 0	0.000 3	225.3	7	215.6	2
26	5.31	57.39	125.17	0.46	0.234 9	0.013 0	0.035 1	0.000 5	214.2	11	222.3	3
27	5.42	62.22	127.59	0.49	0.250 7	0.014 8	0.034 9	0.000 5	227.1	12	221.3	3
28	8.57	68.67	218.76	0.31	0.241 7	0.009 6	0.034 1	0.000 5	219.8	8	216.1	3
29	11.21	88.07	234.64	0.38	0.499 5	0.031 8	0.036 6	0.000 6	411.4	22	231.9	4

前人采用多种同位素方法测年方法对赛什塘矿区侵入岩时代进行了研究, 邱凤岐和董景深<sup>[10]</sup>用黑云母 K-Ar 法获得侵入岩年龄为 218~248 Ma, 李福东等<sup>[27]</sup>获得中粒石英闪长岩锆石 U-Pb 等时线年龄为 222 Ma。1:250 000 区调区域地质调查报告兴海幅<sup>[13]</sup>获得赛什塘两件石英闪长岩两件锆石 U-Pb 年龄为 205.7 和 223 Ma, 李东生等<sup>[13]</sup>采用 K-Ar 获得 I 和 II 号岩体年

龄为 218~247 Ma, 本文作者获得第 2 期石英闪长玢岩和第 4 期花岗斑岩锆石 U-Pb LA-ICPMS 年龄分别为 (223.2±2.2) Ma 和 (219.9±2.6) Ma, 表明岩体各岩性形成时代相近, 时间跨度很小。成岩时代在 220 Ma 左右。与鄂拉山南部的温泉和虎达一带岩体时代, 青海地质调查院詹发余等<sup>[14]</sup>获得石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 (230.1±2) Ma 和 (222±19) Ma, 石英二长闪长岩的

(215.2±5) Ma, 花岗闪长岩的(228.5±0.98) Ma 和(219.8±4.6) Ma。张宏飞等<sup>[28]</sup>获得温泉花岗闪长岩锆石 U-Pb LA-ICPMS 年龄为(218±2) Ma 相一致。表明鄂拉山构造-岩浆岩带为大规模的印支晚期岩浆活动的产物, 而非前人认为印支早期的产物。

#### 4.2 成岩动力学背景

对鄂拉山构造-岩浆岩构造带形成环境尚存在争议: 一种观点是岩浆活动带与发育于东昆仑造山带北部的东昆北岩浆弧带属统一岩浆弧, 为古特提斯洋向北俯冲, 洋壳部分熔融的产物形成的岛弧型岩浆<sup>[29-30]</sup>; 第二种观点认为鄂拉山花岗岩浆带应是西秦岭地块于中三叠世末期在共和坳拉谷西缘发生向柴达木地块之下俯冲碰撞的产物<sup>[9]</sup>; 第三种观点认为是形成陆内环境, 其成岩成矿背景与底侵的岩浆作用有关<sup>[13-14]</sup>。

东昆仑晚古生代-早生代火成岩研究显示, 该区火成岩划分为 2 个阶段<sup>[31]</sup>: P<sub>2</sub>-T<sub>2</sub>(260~230 Ma)大洋板块大规模的俯冲阶段, 形成活动大陆边缘型火成岩和 T<sub>3</sub>-J<sub>1</sub>(230~190 Ma)陆内造山阶段, 出现陆内造山火成岩, 其中, 南缘出现白云母花岗岩, 北缘出现钾玄岩系列火山岩。东昆仑、东昆仑与西秦岭结合地段及秦岭地区印支期花岗岩类的对比分析表明<sup>[28]</sup>, 印支晚期是中央造山带包括鄂拉山地区在内的一次大规模区域性构造岩浆事件, 在印支早期受到强烈碰撞挤压, 地壳发生增厚作用, 并引发岩石圈发生拆沉作用。此后, 地幔软流圈物质将充填已拆沉的岩石圈部分空间或地幔岩浆底侵于下地壳底部, 导致下地壳升温诱发下地壳熔融。岩石圈拆层作用不但为下地壳的熔融作用提供热源, 而且还可能有地幔物质参与下地壳的熔融作用, 或地幔岩浆注入到下地壳熔融的岩浆中, 形成壳-幔岩浆的混合。赛什塘矿区岩体锆石 U-Pb 年龄在 220 Ma 左右, 为印支晚期产物, 野外岩石学岩石地球化学特征显示无 Eu 异常值, 暗示它们形成于加厚的陆壳底部(约 60 km)<sup>[31]</sup>。野外岩石观察可见岩体含有丰富的包体, 暗示发生了岩浆混合作用。赛什塘矿区岩体这些特征有利证实其形成于区域岩石圈拆沉作用的地球动力学背景。

## 5 结论

1) 赛什塘侵入岩体的石英闪长玢岩和花岗斑岩岩石地球特征显示, 主量元素的 A/CNK<1.1, 为偏铝质岩石, 具 I 型花岗岩的特点, 岩石系列属于高钾

钙碱性系列。微量元素具有较弱或无 Eu 异常, 轻稀土富集, 重稀土亏损, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素。

2) 阴极发光显示, 赛什塘矿区岩体锆石绝大多数具环带结构, Th/U 比值显示属岩浆锆石。岩体两件样品锆石 U-Pb LA-ICPMS 测试显示石英闪长岩年龄为(223.2±2.2) Ma (MSWD=0.82), 花岗斑岩年龄为(219.9±2.6) Ma (MSWD=0.89)。岩体各岩相形成时代接近, 为印支晚期的产物。

3) 赛什塘矿区岩体形成于陆内造山, 地壳增厚, 岩石圈拆沉作用, 产生壳-幔混合岩浆的区域岩石圈拆沉作用的地球动力学背景。

#### 致谢:

野外地质调查得到了青海赛什塘铜业有限责任公司的大力帮助, 岩石主量化学分析得到了中南大学地球科学科学与信息物理学院侯林慧老师, 微量元素分析得到中国科学院地球化学研究所胡静高工、锆石制靶和 CL 照相得到中国地质科学院矿产资源所电子探针室周剑雄研究员, 锆石 LA-ICPMS 测试得到了中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室胡兆初教授的帮助, 在此表示衷心的感谢!

#### REFERENCES

- [1] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 谌宏伟, 袁万明, 刘云华. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 403-414.  
MO Xuan-xue, LUO Zhao-hua, DENG Jin-fu, YU Xue-hui, LIU Cheng-dong, CHEN Hong-wei, YUAN Wan-ming, LIU Yun-hua. Granitoids and crustal growth in the east Kunlun orogenic belt [J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 403-414.
- [2] 奎明娟, 柏红喜, 古风宝, 苗国文. 东昆仑构造岩浆带的划分及晚华力西期-燕山期岩石构造组合[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2010, 28(5): 49-55.  
KUI Ming-juan, BAI Hong-xi, GU Feng-bao, MIAO Guo-wen. Division of east Kunlun tectonic magmatic belt and the rock tectonic combination in the late Variscan Yanshanian period [J]. Journal of Qinghai University: Nature Science, 2010, 28(5): 49-55.
- [3] 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 谌宏伟, 李述为, 赵欣. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据[J]. 科学通报, 2004, 49(6): 596-602.  
LIU Cheng-dong, MO Xuan-xue, LUO Zhao-hua, YU Xue-hui, CHEN Hong-wei, LI Shu-wei, ZHAO Xin. Crust-mantle magma

- mixing in east Kunlun: Evidences from zircon SHRIMP geochronology [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(6): 596-602.
- [4] 罗照华, 柯珊, 曹永清, 邓晋福, 谌宏伟. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. 地质通报, 2002, 21(6): 292-297.  
LUO Zhao-hua, KE Shan, CAO Yong-qing, DENG Jin-fu, CHEN Hong-wei. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the east Kunlun [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(6): 292-297.
- [5] 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 罗照华. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 203-211.  
YUAN Wan-ming, MO Xuan-xue, YU Xue-hui, LUO Zhao-hua. The record of Indosinian tectonic setting from the granitoid of eastern Kunlun mountains [J]. Geological Review, 2000, 46(2): 203-211.
- [6] 潘彤, 罗才让, 伊有昌, 钱明. 青海省金属矿产成矿规律及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 165-214.  
PANG Tong, LUO Cai-rang, YI You-chang, QIANG Ming. The metallogenic regularity and metallogenic prediction of metal deposits in Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 165-214.
- [7] 刘增铁, 任家琪, 邬介人, 黄朝晖, 陆海青, 王红英, 张梅芬, 彭兴国, 庞存廉. 青海铜矿[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-291.  
LIU Zeng-tie, REN Jia-qi, WU Jie-ren, HUANG Chao-hui, LU Hai-qing, WANG Hong-ying, ZHANG Mei-fen, PENG Xing-guo, PANG Cun-lian. Qinghai copper deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1-291.
- [8] 李智明, 薛春纪, 王晓虎, 汤桦, 涂其军, 滕家欣, 李荣社. 东昆仑区域成矿特征及有关找矿突破问题分析[J]. 地质论评, 2007, 53(5): 708-717.  
LI Zhi-ming, XUE Chun-ji, WANG Xiao-hu, TANG Hua, TU Qi-jun, TENG Jia-xin, LI Rong-she. Features of regional mineralization and analysis of the exploration development in the eastern Kunlun mountains [J]. Geological Review, 2007, 53(5): 708-717.
- [9] 孙延贵. 西秦岭—东昆仑造山带的衔接转换与共和坳拉谷[D]. 西安: 西北大学, 2004: 1-195.  
SUN Yan-gui. Gonghe aulacogen and conjugate and transfer between the west Qinling and east Kunlun orogens [D]. Xi'an: Northwest University, 2004: 1-195.
- [10] 邱凤岐, 董景深. 青海赛什塘铜矿区岩浆岩及其成矿特征[J]. 青海地质, 1978(3): 1-19.  
QIU Feng-qi, DONG Jing-sheng. The characters of magma and its mineralization in Saishitang copper deposit in Qinghai province [J]. Qinghai Geology, 1978(3): 1-19.
- [11] 宋治杰, 张汉文, 李文明, 张心广, 王维. 青海鄂拉山地区铜多金属矿床的成矿条件及成矿模式[J]. 西北地质科学, 1995, 16(1): 134-144.  
SONG Zhi-jie, ZHANG Han-wen, LI Wen-ming, ZHANG Xin-guang, WANG Wei. Metallogenic condition and model of copper-multi-metal deposits in Ngola shan region, Qinghai province [J]. Northwest Geoscience, 1995, 16(1): 134-144.
- [12] 吴庭祥. 青海赛什塘铜矿床地质特征及成矿模式[J]. 矿产勘查, 2010, 1(2): 140-144.  
WU Tin-xiang. Geological characteristics and metallogenic model of Saishitang copper deposit in Qinghai province [J]. Mineral Exploration, 2010, 1(2): 140-144.
- [13] 李东生, 奎明娟, 古风宝, 王建军, 柏红喜, 詹发余, 王发明, 马彦. 青海赛什塘铜矿床的地质特征及成因探讨[J]. 地质学报, 2009, 83(5): 719-730.  
LI Dong-sheng, KUI Ming-juan, GU Feng-bao, WANG Jian-jun, BAI Hong-xi, ZHAN Fa-yu, WANG Fa-ming, MA Yan. Geological characteristics and genesis of the Saishitang copper deposit in Qinghai province [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(5): 719-730.
- [14] 詹发余, 古风宝, 李东生, 曹连强, 奎明娟. 青海东昆仑埃达克岩的构造环境及成矿意义[J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1352-1368.  
ZHAN Fa-yu, GU Feng-bao, LI Dong-sheng, CAO Lian-qiang, KUI Ming-juan. Tectonic environment of Adakite in eastern Kunlun area, Qinghai, and its ore-forming significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10): 1352-1368.
- [15] 丰成友, 李东生, 吴正寿, 马圣钞, 李国臣, 王松. 青海东昆仑成矿带斑岩型矿床的确认及找矿前景分析[J]. 矿物学报, 2009, 29(S): 171-172.  
FENG Cheng-you, LI Dong-sheng, WU Zheng-shou, MA Sheng-chao, LI Guo-chen, WANG Song. The confirmation of the porphyry deposits and exploration prospect of east Kunlun ore belt in Qinghai [J]. Acta Mineralogical Sinica, 2009, 29(S): 171-172.
- [16] 林德经. 青海赛什塘铜矿地质特征及矿床成因初步探讨[J]. 西北地质, 1983(4): 30-39.  
LIN De-jing. The geology characters and ore genesis of Saishitang copper deposit in Qinghai [J]. Northwest Geology, 1983(4): 30-39.
- [17] 赖健清. 青海赛什塘铜多金属矿成矿规律总结研究中期报告[R]. 长沙: 中南大学, 2010: 1-52.  
LAI Jian-qing. The comprehensive research of metallogenic regularity of copper multi-metal deposit in Saishitang mine, Qinghai Province (middle-term)[R]. Changsha: Central South University, 2010: 1-52.
- [18] YUAN H L, GAO S, LIU X M, LI H M, GUNTHER D, WU F Y. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3): 195-204.

- 353-370.
- [19] LIU Yong-shen, HU Zhao-chu, GAO Chang-gui, ZONG Ke-qing, WANG Dong-bing. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interaction in the trans-north China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *J Petrology*, 2009, 51(1/2): 537-571.
- [20] ANDERSEN T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [21] LUDWIG K R. User manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A geochronological tool for Microsoft Excel [R]. Berkeley Geochronology Center, 2001: 1-56.
- [22] LE BAS M J, LE MAITRE R W, STRECKEISEN A, ZANETTIN B. A chemical classification of volcanic rocks on the total alkali-silica diagram [J]. *J Petrol*, 1986, 27: 745-750.
- [23] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoid [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 635-643.
- [24] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22: 247-263.
- [25] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// *Magmatism in Oceanic Basins*. London: Geological Society, 1989: 313-345.
- [26] WILSON M. *Igneous petrogenesis* [M]. London: Springer, 1989: 1-466.
- [27] 李福东, 张汉文, 宋治杰. 鄂拉山地区热水成矿模式[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993: 9-144.  
LI Fu-dong, ZHANG Han-wen, SONG Zhi-jie. Thermal water metallogenic model in Ngola shan region [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1993: 9-144.
- [28] 张宏飞, 陈岳龙, 徐旺春, 刘 荣, 袁洪林, 柳小明. 青海共和盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 2910-2922.  
ZHANG Hong-fei, CHEN Yue-long, XU Wang-chun, LIU Rong, YUAN Hong-lin, LIU Xiao-ming. Granitoids around Gonghe basin in Qinghai Province: Petrogenesis and tectonic implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(12): 2910-2922.
- [29] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 86-98.  
PAN Gui-tang, LI Zhi-liang, LI Xing-zheng. The formation and evolution of east Tethyan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 86-98.
- [30] 赖健清, 安江华, 王雄军, 毛 寅, 宋泽友, 曹勇华, 陶斤金, 郭志军, 王 晶. 赛什塘矿区侵入岩的地球化学特征及构造环境分析[J]. *矿产与地质*, 2010, 24(5): 460-465.  
LAI Jian-qing, AN Jiang-hua, WANG Xiong-jun, MAO Yin, SONG Ze-you, CAO Yong-hua, TAO Jin-jin, GUO Zhi-jun, WANG Jing. Geochemical characteristics and tectonic environment analysis of the intrusive rocks in Saishitang ore field [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2010, 24(5): 460-465.
- [31] 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 莫宣学, 罗照华. 青藏东昆仑晚古生代末-中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. *现代地质*, 1998, 12(3): 344-352.  
GUO Zheng-fu, DENG Jin-fu, XU Zhi-qin, MO Xuan-xue, LUO Zhao-hua. Late Palaeozoic-Mesozoic intercontinental orogenic process and intermediate-acidic igneous rocks from the eastern Kunlun mountains of northwestern China [J]. *Geoscience*, 1998, 12(3): 344-352.

(编辑 陈卫萍)