

# 西天山莱历斯高尔一带铜(钼)矿成矿斑岩年代学、地球化学及其意义\*

张东阳 张招崇\*\* 艾羽 苏慧敏

ZHANG DongYang, ZHANG ZhaoChong\*\*, AI Yu and SU HuiMin

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2008-06-01 收稿, 2009-03-24 改回.

Zhang DY, Zhang ZC, Ai Y and Su HM. 2009. Geochronology, geochemistry of the ores-bearing porphyries in the Lailisigao'er region, western Tianshan: Implications for their tectonic setting and mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (6):1319–1331

**Abstract** Western Tianshan is located in the north part of the Yili plate, i. e., orogenic belt between Junggar plate and Yili basin. The Lailisigao'er Mo deposit and 3571 Cu deposit no more than 1 km distance are situated in the middle section of the Late Paleozoic Biezhentao-kokirqin island arc. The porphyries closely related to metallogenesis, are predominated by monzodioritic porphyry and granodioritic porphyry. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating on the two porphyries yield the average ages of  $354 \pm 0.65$  Ma and  $346 \pm 1.2$  Ma respectively, implying that they are co-magmatic in the early Carboniferous. Their major- and trace-element compositions suggest that they are the typical calc alkaline volcanic arc granites, formed a continental arc setting. Combined with its geological background, the porphyries might be related to the southward subduction of the Junggar plate during the Late Paleozoic time. Their  $I_{Sr}$  and  $\epsilon_{Nd}(t)$  ratios range from 0.7079 to 0.7103 and  $-0.61$  to  $-3.71$  respectively, suggesting that they were mainly derived from crust (50% ~ 70%) contaminated by minor mantle materials. Their geochemical compositions reflect that the two porphyries are co-magmatic relationship, and the dykes outcropped in the 3571 copper porphyry was inferred to correspond with the upper part of the Lailisigao'er Cu-Mo deposit. Thus, there may be a potential region beneath the 3571 mine for prospecting for the Lailisigao'er type porphyry Cu-Mo deposit.

**Key words** Porphyry; Geochronology; Lailisigao'er; Western Tianshan; Xinjiang

**摘要** 西天山位于伊犁板块北部,即准噶尔板块与伊犁盆地之间的造山带。位于别珍套-科古琴晚古生代岛弧中段的莱历斯高尔一带斑岩型矿床主要分布有莱历斯高尔钼矿和 3571 铜矿,直线距离不足 1km,与成矿作用有着密切关系的斑岩体以二长闪长斑岩、花岗闪长斑岩为主。对两个斑岩体的锆石 LA-ICP-MS 测年结果表明,3571 铜矿和莱历斯高尔钼矿斑岩体的形成年龄分别为  $354 \pm 0.65$  Ma 和  $346 \pm 1.2$  Ma,指示其均形成于早石炭世。主要元素和微量元素具有典型钙碱性岩系火山弧花岗岩的特征,暗示其形成于大陆弧环境。结合区域构造背景,推测斑岩体的形成可能与晚古生代准噶尔洋板块向南的俯冲作用有关。本区两个斑岩体的总同位素初始值  $I_{Sr}$  和  $\epsilon_{Nd}(t)$  分别为  $0.7079 \sim 0.7103$  和  $-0.61 \sim -3.71$ ,其源区物质主要来源于地壳(50% ~ 70%),并有少量的地幔物质的混入。由于两个斑岩体的地球化学特征均显示出它们具有同源演化关系,推测 3571 出露的岩脉可能相当于莱历斯高尔斑岩体的上部,其深部可能存在莱历斯高尔式的斑岩钼矿化,因此 3571 铜矿区具有很好的找矿前景。

**关键词** 斑岩;年代学;莱历斯高尔;西天山;新疆

中图法分类号 P588.13; P597.3; P618.41

\* 国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B01 和 2007BAB25B05)资助成果。

第一作者简介:张东阳,男,1985年生,学士,岩石学专业,E-mail: zhangdongyang85@163.com

\*\* 通讯作者:张招崇,男,1965年生,教授,岩石学专业,E-mail: zczhang@cugb.edu.cn

# 1 引言

新疆天山地处中亚斑岩铜矿成矿带腹地,是寻找斑岩铜矿的有利地区(王志良等, 2006)。西天山作为天山重要的斑岩矿床的产出地区,在斑岩铜钼矿找矿勘查方面获得了比较显著的成绩,逐渐成为我国重要的斑岩型矿床找矿带,发现了喇嘛苏、达巴特、冬吐劲、3571、莱历斯高尔、肯登高尔等中小型斑岩铜钼矿以及塔吾尔别克斑岩金矿等。西天山斑岩型成矿带与哈萨克斯坦(科恩纳德、阿克托盖、博舍库利和科克赛)、乌兹别克斯坦(阿尔玛雷克)和蒙古(欧玉陶勒盖)

的大型-超大型斑岩铜矿等一起构成了全球三大斑岩型成矿带之一的中亚斑岩铜矿成矿带。莱历斯高尔一带的3571铜矿和莱历斯高尔钼矿处于西天山别珍套-科古琴晚古生代岛弧中段,位于新疆精河县境内,是2000年前后由新疆地矿局第七地质大队发现的斑岩型铜钼矿床。然而,由于受到自然条件和交通条件不便的制约,迄今为止对莱历斯高尔一带斑岩型矿床的基础地质研究和勘查程度均比较低,结合区域构造背景,目前基本确定西天山在泥盆纪-石炭纪期间,准噶尔洋向南的俯冲作用形成一个完整的晚古生代沟-弧-盆体系(图1)。

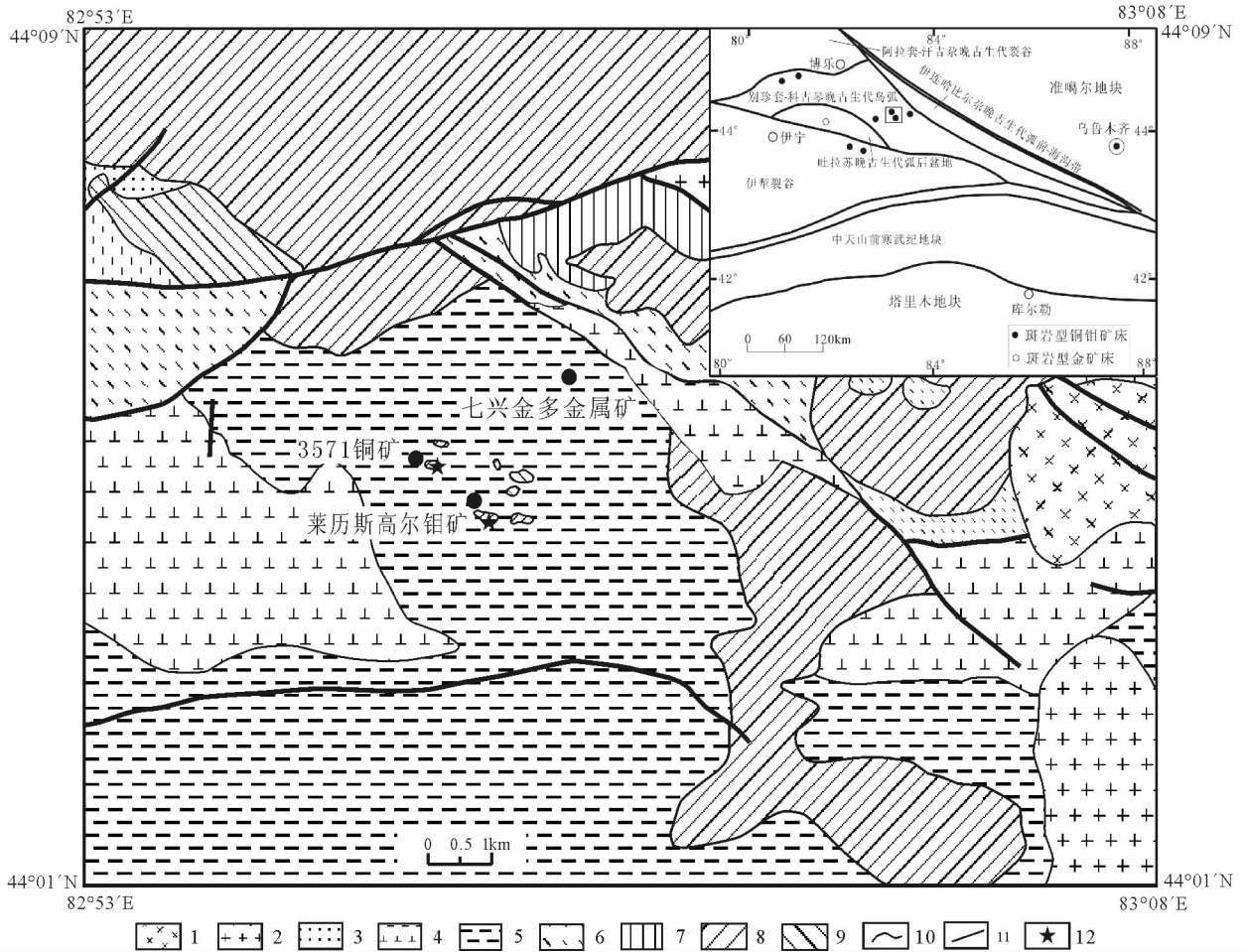


图1 西天山莱历斯高尔一带区域地质图(据王志良等,2004;左国朝等,2008;新疆地矿局第七地质大队<sup>①</sup>)

1-下二叠统乌郎组;2-下石炭统大哈拉军山组;3-中泥盆统汗吉杂组;4-上志留统博罗霍洛山组;5-上志留统库格尔组;6-上奥陶统呼独克达坂组;7-中奥陶统奈楞格勒达坂组;8-二长闪长斑岩;9-花岗闪长斑岩;10-地质界线;11-断裂;12-测年样品采样位置

Fig. 1 Regional geology of the Lailisigao'er region, in western Tianshan (after Wang *et al.*, 2004; Zuo *et al.*, 2008)

1-Lower Permian Wulang Formation; 2-Low Carboniferous Dahalajun Formation; 3-Middle Devonian Hanjiga Formation; 4-Upper Silurian Boluoheluoshan Formation; 5-Upper Silurian Kuruer Formation; 6-Upper Ordovician Hudukedaban Formation; 7-Middle Ordovician Nailenggeladaban Formation; 8-monzodioritic porphyry; 9- granodioritic porphyry; 10-geological boundary; 11-fault; 12-position of the measured age samples

<sup>①</sup> 新疆地矿局第七地质大队. 2007. 新疆精河县莱历斯高尔一带铜钼矿及外围金多金属矿普查报告

西天山斑岩铜矿的成矿时代为晚古生代(隗合明等,1999;王志良等,2006),但具体的时代并不十分清楚。李华芹等(2006)对莱历斯高尔钼矿床成矿斑岩进行过 SHRIMP 锆石 U-Pb 法( $362 \pm 12\text{Ma}$ )和含矿石英矿物 Rb-Sr 同位素测年( $350 \pm 15\text{Ma}$ ),但由于用于计算锆石 U-Pb 法年龄的有效点仅有 9 个,并且误差较大( $340 \sim 392\text{Ma}$ ),给出的时代跨越了石炭纪和泥盆纪的界限(下石炭世与上泥盆世的分界为  $359.2 \pm 2.5\text{Ma}$ ),所以可信度较低,从而影响了与境外的哈萨克斯坦等巨型斑岩成矿带的对比。另外,莱历斯高尔钼矿的旁侧 3571 存在矿化迹象,地表虽然有含矿斑岩脉,但深部是否存在类似于莱历斯高尔斑岩矿尚不清楚。笔者在前人研究工作的基础上,以莱历斯高尔一带的 3571 铜矿床和莱历斯高尔钼矿床为对象,拟通过两个成矿斑岩体单颗粒锆石的 LA-ICP-MS 年代学及斑岩体的地球化学研究,探讨 3571 铜矿和莱历斯高尔钼矿区斑岩体的形成机制及其相互关系,为莱历斯高尔一带斑岩型矿床的找矿提供重要信息,并为该区的构造演化和成矿地质背景提供重要证据。

## 2 矿区地质特征

西天山位于准噶尔板块与塔里木板块夹持的伊犁板块北半部分,即准噶尔板块与伊犁盆地之间的造山带,是欧亚构造域中亚-蒙古-鄂霍茨克弧形造山带的重要组成部分。西天山莱历斯高尔一带斑岩铜钼矿床产于西天山成矿带别珍套-科古琴晚古生代岛弧中段,主要包括莱历斯高尔斑岩型钼矿、3571 斑岩型铜矿,两矿区直线距离不到 1km。区内出露的地层为上志留统库茹尔组和博罗霍洛山组浅变质沉积碎屑岩(图 1)。两个矿区总体构造线方向呈北西向,无明显的褶皱,地表上小型断裂构造较发育,多呈北北东-北东东向,个别呈北西向。莱历斯高尔矿区共有 7 个出露的斑岩体,岩性主要为二长闪长斑岩、花岗闪长斑岩,斑岩体多呈不规则岩株状产出,平面上呈哑铃状、不规则圆形状,在剖面上呈筒状产出,长约 80~450m,宽约 30~200m,延深一般大于 200m,产状陡倾。相对莱历斯高尔钼矿区,3571 铜矿区出露的斑岩体较少,地表仅出露少量岩脉,主要岩性为二长闪长斑岩,总体呈近东西向带状分布,含矿斑岩出露面积很小,不到  $10\text{m}^2$ 。

## 3 斑岩体岩相学特征

结合 IUGS 的矿物 QAP 定量分类方案(1989,转引自邱家骧,1991),经过较为详细的手标本和显微镜观察,成矿斑岩体的岩相学特征如下:

二长闪长斑岩,呈灰色,半自形中细粒结构或似斑状结构,斑状结构不明显,块状构造。主要矿物为石英(15%~20%)、斜长石(15%~25%)、钾长石(15%~25%)、角闪石(20%~25%);石英多为他形粒状,颗粒小者  $0.05 \times$

$0.05\text{mm}$ ,大者为  $1.2 \times 1.4\text{mm}$ ,平均约为  $0.4 \times 0.4\text{mm}$ ,可见较明显的熔蚀现象;斜长石呈柱状、板状,颗粒小者  $0.05 \times 0.1\text{mm}$ ,大者为  $1.0 \times 1.2\text{mm}$ ,平均约为  $0.4 \times 0.6\text{mm}$ ,可见聚片双晶、环带构造,局部发育绢云母化;钾长石多为柱状,颗粒小者  $0.1 \times 0.2\text{mm}$ ,大者为  $1.0 \times 1.2\text{mm}$ ,平均约为  $0.4 \times 0.6\text{mm}$ ;角闪石呈自形-半自形柱状,绿-淡黄色,多色性较强,颗粒小约  $0.2 \times 0.3\text{mm}$ ,大者为  $1.0 \times 1.5\text{mm}$ ,平均为  $0.4 \times 0.5\text{mm}$ ,可见角闪石简单双晶。次要矿物为黑云母(5%~10%),片状,浅黄或褐红色,多色性极强,粒度小者  $0.15 \times 0.2\text{mm}$ ,大者为  $1.2 \times 1.5\text{mm}$ ,平均约为  $0.5 \times 0.6\text{mm}$ ,局部绿泥石化,甚至发生完全的绿泥石化。副矿物有楣石(1%~2%)、锆石(1%~2%)、磁铁矿(1%~2%)。

花岗闪长斑岩,呈灰白色,花岗结构(不定向排列),块状构造,主要矿物为石英(20%~25%)、斜长石(30%~35%)、钾长石(15%~20%);石英,多为他形粒状,颗粒小者  $0.1 \times 0.1\text{mm}$ ,大者为  $1.2 \times 1.4\text{mm}$ ,平均约为  $0.4 \times 0.5\text{mm}$ ;斜长石,呈柱状、板状,颗粒小者  $0.1 \times 0.2\text{mm}$ ,大者为  $1.0 \times 1.4\text{mm}$ ,平均约为  $0.4 \times 0.6\text{mm}$ ,部分绢云母化;钾长石,多为柱状,颗粒小者  $0.2 \times 0.3\text{mm}$ ,大者为  $1.0 \times 1.2\text{mm}$ ,平均约为  $0.3 \times 0.6\text{mm}$ 。次要矿物为黑云母(5%~10%)、角闪石(5%~10%);黑云母,片状,浅黄或褐红色,多色性极强,粒度小者  $0.1 \times 0.15\text{mm}$ ,大者为  $1.0 \times 1.2\text{mm}$ ,平均约为  $0.4 \times 0.5\text{mm}$ ,部分颗粒沿解理缝发生绿泥石化;角闪石,自形-半自形柱状,颗粒小约  $0.2 \times 0.3\text{mm}$ ,大者为  $1.0 \times 1.5\text{mm}$ ,平均约为  $0.4 \times 0.5\text{mm}$ ,绿-淡黄色,多色性较强,部分发生绿泥石化,可见角闪石简单双晶。副矿物有锆石(1%~2%)、磷灰石(1%~2%)、磁铁矿(<1%)。

## 4 样品和分析方法

本文样品来自莱历斯高尔矿区和 3571 铜矿区的斑岩体,其中 D3-01 和 D7-03 来自 3571 铜矿区的斑岩体,其余样品均来自莱历斯高尔钼矿区。本文所用的测试样品是经过手标本和显微镜观察后,挑选无蚀变和矿化影响或蚀变甚弱的样品。

用于定年的样品 D7 和 D14 分别采自 3571 铜矿区和莱历斯高尔矿区的二长闪长斑岩体中。将野外所采样品破碎为颗粒样品,采用常规重-磁选方法,除去长石、石英、云母等轻比重矿物和磁铁矿、磁黄铁矿等磁性矿物,最后在双目镜下挑取出较多的锆石。这些锆石以自形为主,多数呈短柱状,少量呈长柱状、粒状及碎屑状,无色-淡玫瑰色,表面光滑,明显的金刚光泽等特征。锆石样品的制样方法是:将锆石单矿物粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后抛光至锆石露出一个平面。

锆石的原位 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成。其激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的

GeoLas200M, 测试时激光束斑直径为  $30\mu\text{m}$ , 剥蚀深度  $20\sim 40\mu\text{m}$ , 激光脉冲  $10\text{Hz}$ , 能量  $34\sim 40\text{mJ}$ ; 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)系统为 Agilent7500a。锆石的同位素组成以锆石 91500 为外标进行校正, 微量元素组成以玻璃标样 NIST610 做外标,  $\text{SiO}_2$  含量为内标进行校正 (Gao *et al.*, 2002; 袁洪林等, 2003; Yuan *et al.*, 2004)。锆石微量和同位素数据采用 GLITTER 程序, 普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法, 年龄计算使用 Isoplot (ver3.00) 完成 (Ludwig, 2003)。

微量元素分析在中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室完成, 分析方法为 XRF, 分析精度优于  $0.1\%\sim 1.0\%$ , 其中 FeO 含量用湿化学法测定, 分析精度优于  $0.5\%\sim 1.0\%$ 。微量元素在中国地质大学(北京)地学实验中心完成, 分析方法为 ICP-MS, 实验室分析详细方法见 Han *et al.* (2007)。Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析由中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室的 Finnigan MAT-

262 质谱上进行, 详细的分析流程类似黄莹和吴利仁 (1990)。标样结果如下:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (Sr 标样 NBS987) 为  $0.710252\pm 11$ ;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (Nd 标样 Jndi-1) 为  $0.512112\pm 11$ , 用  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1194$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7129$  进行 Sr 和 Nd 同位素质量歧视校正。Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程本底大约是  $10^{-10}\text{g}$  和  $10^{-11}\text{g}$ 。

#### 4.1 年代学

本次测试所用的样品 D7 和 D14 单颗粒锆石分别有 24 颗和 25 颗, 共获得有效年龄数据 36 件 (经正常铅校正, 分别为样品 D7 有 18 件、样品 D14 有 18 件, 见表 1)。斑岩体样品的部分代表性锆石的阴极发光 (CL) 图像 (图 2) 显示锆石中振荡环带结构较发育, 应为典型的岩浆结晶锆石。研究表明, 不同成因锆石有不同的 Th、U 含量与 Th/U 比值 (Rubatto and Gebauer, 2000; Liati *et al.*, 2002)。一般情况下, 岩浆锆

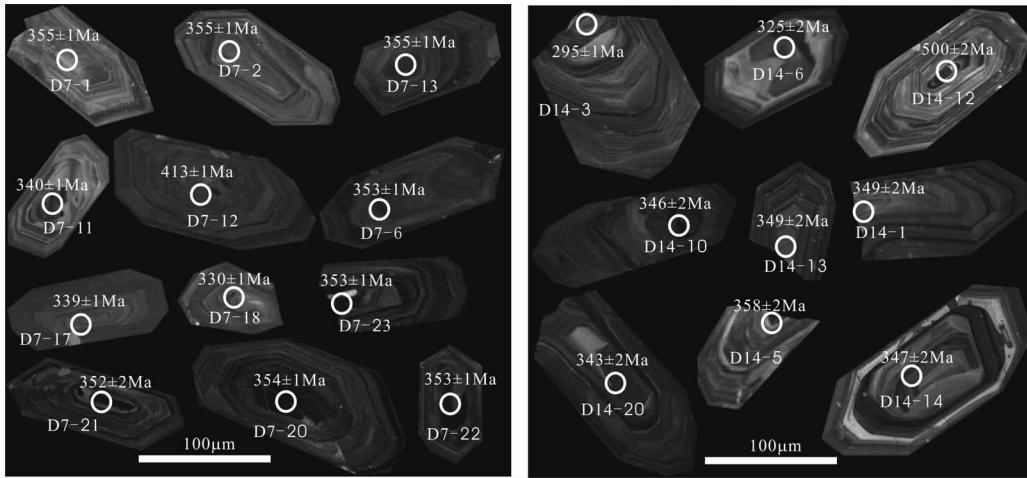


图 2 3571 铜矿二长闪长斑岩 (D7) 和莱历斯高尔钼矿二长闪长斑岩 (D14) 中锆石阴极发光图像

Fig. 2 CL images of zircons of monzodioritic porphyry (sample D7) in the 3571 copper deposit and monzodioritic porphyry (sample D14) in the Lailisigao'er molybdenum deposit

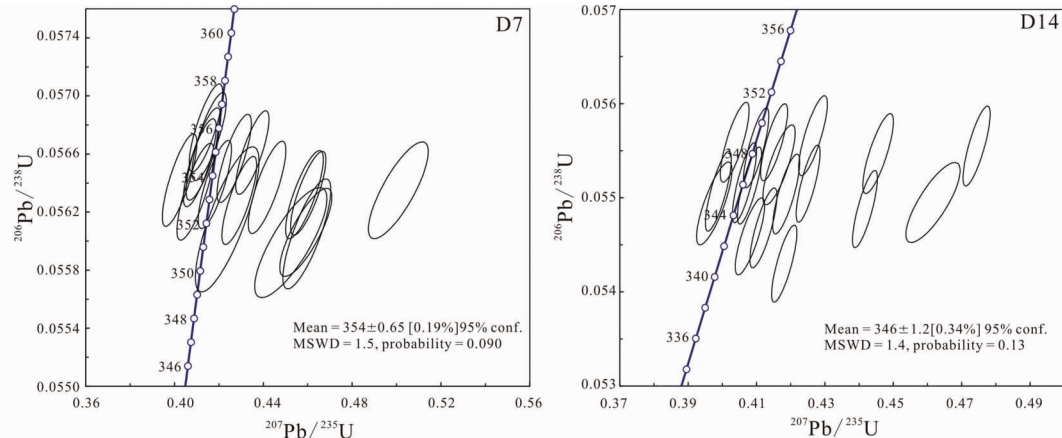


图 3 3571 铜矿二长闪长斑岩 (D7) 和莱历斯高尔钼矿二长闪长斑岩 (D14) 中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 3 Concordia diagrams showing zircon LA-ICPMS U-Pb dating results of monzodioritic porphyry sample D7 in the 3571 copper deposit and monzodioritic porphyry sample D14 in the Lailisigao'er molybdenite deposit

表1 莱历斯高尔一带斑岩样品 D7 和 D14 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of the porphyry sample D7 and D14 in the Lailisigao'er region

样品号	点号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma)	$\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\sigma$	Th ( $\times 10^{-6}$ )	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th/U
D7	D7-01	355	1	0.4351	0.0049	0.0566	0.0002	238.83	424.12	0.56
	D7-02	355	1	0.4130	0.0052	0.0566	0.0002	390.16	518.31	0.75
	D7-03	356	1	0.4156	0.0051	0.0567	0.0002	226.50	281.15	0.81
	D7-04	353	1	0.5179	0.0063	0.0565	0.0002	275.74	423.13	0.65
	D7-05	355	1	0.4114	0.0049	0.0565	0.0002	373.37	353.52	1.06
	D7-06	353	1	0.4095	0.0055	0.0563	0.0002	294.59	370.49	0.80
	D7-07	354	1	0.4023	0.0051	0.0564	0.0002	184.49	282.24	0.65
	D7-08	354	1	0.4417	0.0056	0.0564	0.0002	219.55	307.79	0.71
	D7-09	352	1	0.5160	0.0056	0.0566	0.0002	265.83	495.23	0.54
	D7-10	353	1	0.4602	0.0053	0.0563	0.0002	422.38	516.29	0.82
	D7-11	340	1	0.4088	0.0051	0.0542	0.0002	533.25	504.52	1.06
	D7-12	413	1	0.5850	0.0067	0.0662	0.0002	119.51	280.79	0.43
	D7-13	355	1	0.4269	0.0051	0.0566	0.0002	214.73	346.04	0.62
	D7-14	373	4	3.4662	0.0418	0.0850	0.0004	135.11	245.25	0.55
	D7-15	351	2	0.5328	0.0076	0.0567	0.0002	201.78	289.77	0.70
	D7-16	336	1	0.7410	0.0086	0.0559	0.0002	566.29	699.94	0.81
	D7-17	339	1	0.4407	0.0052	0.0542	0.0002	171.64	295.13	0.58
	D7-18	330	1	0.6396	0.0066	0.0546	0.0002	482.32	1103.5	0.44
	D7-19	356	1	0.4142	0.0050	0.0568	0.0002	207.52	308.95	0.67
	D7-20	354	1	0.4182	0.0050	0.0564	0.0002	303.40	490.81	0.62
	D7-21	352	2	0.4596	0.0071	0.0561	0.0003	254.36	369.41	0.69
	D7-22	353	1	0.4292	0.0052	0.0563	0.0002	275.74	389.42	0.71
	D7-23	353	1	0.4585	0.0056	0.0563	0.0002	500.41	571.57	0.88
	D7-24	352	2	0.4237	0.0094	0.0562	0.0003	164.27	294.19	0.56
D14	D14-01	349	2	0.4151	0.0026	0.0556	0.0003	220.19	299.55	0.74
	D14-02	323	2	0.3859	0.0022	0.0514	0.0003	156.95	318.06	0.49
	D14-03	295	1	0.5471	0.0037	0.0468	0.0002	1153.8	825.84	1.40
	D14-04	343	2	0.4081	0.0028	0.0546	0.0003	150.03	207.07	0.72
	D14-05	358	2	0.4594	0.0052	0.0572	0.0003	128.31	275.01	0.47
	D14-06	325	2	0.4162	0.0055	0.0517	0.0003	168.78	306.00	0.55
	D14-07	346	2	0.4079	0.0023	0.0551	0.0003	350.05	429.23	0.82
	D14-08	341	2	0.4181	0.0024	0.0543	0.0003	237.65	420.37	0.57
	D14-09	345	2	0.4616	0.0052	0.0550	0.0003	283.71	508.84	0.56
	D14-10	346	2	0.4251	0.0023	0.0552	0.0003	252.25	492.28	0.51
	D14-11	344	2	0.4417	0.0024	0.0549	0.0003	395.40	529.02	0.75
	D14-12	500	2	0.7290	0.0037	0.0807	0.0004	421.98	746.33	0.57
	D14-13	349	2	0.4265	0.0028	0.0557	0.0003	333.95	447.90	0.75
	D14-14	347	2	0.4166	0.0031	0.0554	0.0003	285.94	380.45	0.75
	D14-15	349	2	0.4036	0.0028	0.0556	0.0003	118.20	263.27	0.45
	D14-16	341	2	0.5066	0.0032	0.0544	0.0003	382.72	302.25	1.27
	D14-17	334	2	0.5421	0.0078	0.0531	0.0003	231.17	295.73	0.78
	D14-18	348	2	0.4099	0.0025	0.0555	0.0003	213.96	417.15	0.51
	D14-19	345	2	0.4187	0.0026	0.0550	0.0003	274.77	456.50	0.60
	D14-20	343	2	0.4120	0.0026	0.0547	0.0003	172.51	274.34	0.63
	D14-21	345	2	0.3976	0.0034	0.0549	0.0003	78.82	120.75	0.65
	D14-22	346	2	0.4065	0.0023	0.0552	0.0003	209.60	315.68	0.66
	D14-23	346	2	0.3988	0.0025	0.0551	0.0003	187.51	272.06	0.69
	D14-24	348	2	0.4456	0.0030	0.0555	0.0003	345.71	459.88	0.75
	D14-25	349	2	0.4744	0.0026	0.0556	0.0003	698.29	625.16	1.12

表2 莱历斯高尔一带斑岩主量元素测试结果(wt%)及其有关参数

Table 2 Composition of major elements (wt%) and related parameters of the porphyries in the Lailisigao'er region

矿区	3571 铜矿		莱历斯高尔钼矿											
	样品号	D3-1	D7-3	D8-1	D9-2	D10-1	D12-1	D14-1	LLK-1	LLK-7	LLK-15	LLK-9	LLK-12	LLK-13
岩性	二长闪长斑岩							花岗闪长斑岩						
SiO <sub>2</sub>	76.55	65.76	70.21	70.31	69.03	69.43	69.91	67.55	58.49	69.96	58.67	66.64	61.97	
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.54	0.32	0.35	0.35	0.41	0.36	0.37	0.62	0.24	0.51	0.32	0.65	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.19	14.97	14.54	14.08	14.51	13.70	14.13	15.29	16.30	13.59	12.65	14.73	16.63	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.24	0.09	0.63	1.10	0.05	0.76	0.53	0.30	0.92	0.44	1.89	0.68	0.42	
FeO	2.72	2.38	1.97	2.31	2.96	2.18	1.77	2.05	3.36	1.31	4.19	0.82	4.62	
MnO	0.10	0.08	0.08	0.07	0.08	0.10	0.07	0.08	0.11	0.06	0.15	0.07	0.13	
MgO	2.41	1.91	0.91	1.28	0.93	1.30	1.09	0.85	1.68	0.54	1.89	0.58	2.02	
CaO	3.39	3.71	2.36	0.52	2.29	2.04	2.11	2.33	4.30	2.57	5.21	4.15	2.88	
Na <sub>2</sub> O	2.36	3.40	3.06	2.83	3.19	2.84	2.75	2.86	3.07	2.66	2.07	2.32	3.87	
K <sub>2</sub> O	0.73	4.44	4.04	4.57	4.11	5.12	5.36	5.38	3.41	4.70	2.89	4.03	2.90	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.13	0.09	0.11	0.12	0.12	0.10	0.14	0.20	0.11	0.14	0.13	0.19	
LOI	1.94	1.70	0.86	1.58	1.50	1.22	1.00	2.02	6.82	3.06	8.58	4.76	2.54	
Total	99.26	99.13	99.10	99.13	99.15	99.24	99.19	99.24	99.32	99.26	98.89	99.24	98.87	
FeO <sup>T</sup>	3.83	2.46	2.54	3.30	3.01	2.86	2.25	2.32	4.18	1.71	5.89	1.43	4.99	
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	3.09	7.84	7.10	7.40	7.30	7.96	8.11	8.24	6.48	7.36	4.96	6.35	6.77	
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.31	1.31	1.32	1.61	1.29	1.80	1.95	1.88	1.11	1.77	1.40	1.74	0.75	
A/CNK	0.66	0.87	1.06	1.33	1.05	0.98	1.00	1.04	0.98	0.96	0.79	0.94	1.13	
A/NK	1.54	1.44	1.55	1.47	1.50	1.34	1.37	1.45	1.87	1.44	1.94	1.80	1.75	
σ	0.28	2.70	1.85	2.01	2.05	2.40	2.44	2.77	2.71	2.01	1.57	1.71	2.42	
C	0.00	0.00	1.08	3.89	0.95	0.06	0.20	0.90	0.25	0.00	0.00	0.00	2.43	

石的 Th、U 含量较高, Th/U 比值较大(一般 >0.4); 而变质锆石的 Th、U 含量低, Th/U 比值小(通常小于 0.07, Hoskin and Schaltegger, 2003; Rubatto, 2002)。由 1 表可以看出, 3571 铜矿区和莱历斯高尔钼矿区两个斑岩体锆石的 Th/U 值均较高, 分别为 0.43 ~ 1.06 和 0.45 ~ 1.40, 均显示岩浆锆石的特征。

在样品 D7 的 24 个点结果中(表 1), 除分析点号为 D7-12 的结果明显偏老, D7-11、-14、-16、-17、-18 偏年轻外, 其余 18 个测点基本落在谐和曲线上或附近, 其表面年龄范围在 350 ± 1 ~ 356 ± 1 Ma 之间, 加权平均年龄为 354 ± 0.65 Ma, MSWD = 1.5(图 3), 该年龄代表了成矿期斑岩体锆石的结晶年龄。

样品 D14 的 25 个测点的结果中(表 1), 除分析点号为 D14-2、-3、-6、-16、-17 结果偏年轻, D14-5、-12 明显偏老外, 其他 18 个测点的表面年龄范围在 341 ± 2 ~ 349 ± 2 Ma 之间, 加权平均年龄 346 ± 1.2 Ma, MSWD = 1.4(图 3), 该年龄代表了成矿期斑岩体锆石的结晶年龄。

因此, 年龄测定结果表明 3571 和莱历斯高尔的斑岩体形成时代在测定误差范围内基本一致, 基本上可以推测出它们应属于同期次侵入的。

## 4.2 地球化学

### 4.2.1 主量元素

主量元素分析结果和 CIPW 标准矿物计算结果列于表 2。由表 2 可知, 本区样品中 SiO<sub>2</sub> 含量变化 58.49% ~

70.31% 之间, TiO<sub>2</sub> 为变化范围为 0.24% ~ 0.65%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在 12.65% ~ 16.63% 之间, 个别样品(D3-1)因岩石硅化等蚀变影响 SiO<sub>2</sub> 含量偏高达 76.55%, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量偏低, 为 7.19%。

从表 2 中可看出, 随着 SiO<sub>2</sub> 含量增加, 主量元素 TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、MnO、CaO、Na<sub>2</sub>O 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等氧化物的含量呈递减的趋势, 只有 K<sub>2</sub>O 随着 SiO<sub>2</sub> 含量的增加而呈递增的趋势(图 4)。这种良好的负相关性说明 3571 铜矿和莱历斯高尔钼矿斑岩体是同源岩浆分异演化的产物, 而 K<sub>2</sub>O 与 SiO<sub>2</sub> 不呈演化关系可能是由于岩体不同程度的钾化有关。

本区样品的里特曼指数 σ 变化范围为 0.28 ~ 2.77, 指示其为钙碱性岩石。Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O 变化范围为 3.09% ~ 8.24%, 大多数位于 6.35% 以上; K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 变化范围为 0.31 ~ 1.95, 多数大于 1, 说明本区花岗质岩石主要富碱、高钾特点。在 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解(图 5)中可以看出, 莱历斯高尔和 3571 含矿斑岩多属于高钾(钙碱性)系列-钾玄岩系列。

由主量元素的 CIPW 标准矿物(表 2)可知, 本区花岗质岩石中部分样品含有少量的刚玉标准矿物(C = 0.06% ~ 3.89%), A/CNK 值介于 0.66 ~ 1.33 之间, A/NK 值为 1.34 ~ 1.94, 在图 5 中两者呈较明显的负相关, 显示与 CAG(大陆弧花岗岩)和 IAG(岛弧花岗岩)类似的演化特征, 而与 CCG(大陆碰撞花岗岩)明显不同(Maniar and Piccoli, 1989)。

### 4.2.2 微量元素

由微量元素洋中脊花岗岩标准化蛛网图(图 6)可知, 无

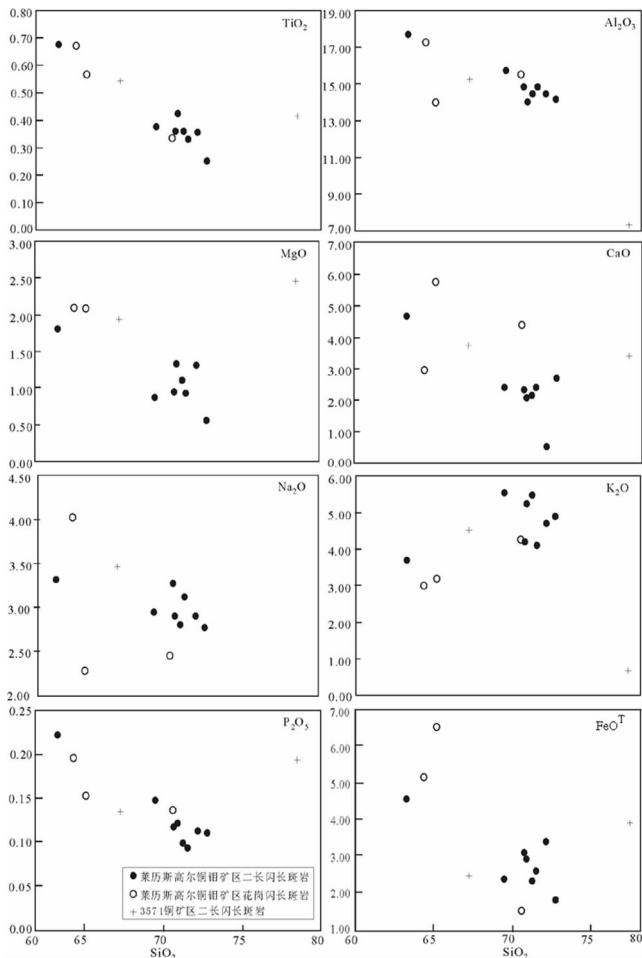


图4 莱历斯高尔一带斑岩体哈克图解

Fig. 4 Harker diagrams of the porphyries in the Lailisigao'er region

论是二长闪长斑岩还是花岗闪长斑岩, 总体富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba), 而相对亏损高场强元素(Zr、Y), 这种

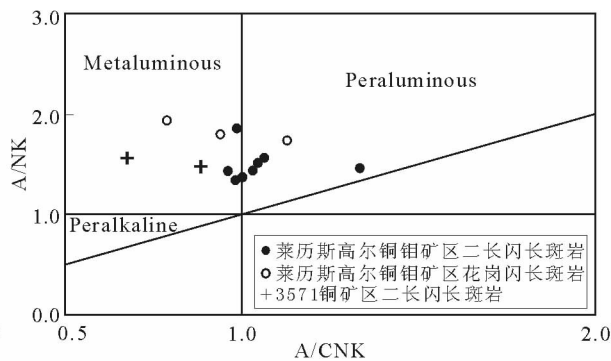
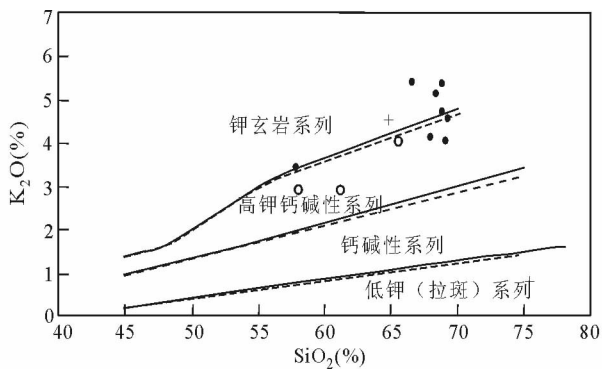


图5 岩石系列划分的  $K_2O-SiO_2$  图解(据 Rickwood, 1989; Morrison, 1980; Rollinson, 1993) 和  $A/NK-A/CNK$  图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5  $K_2O-SiO_2$  diagram for classification of rock series (after Rickwood, 1989; Morrison, 1980; Rollinson, 1993) and  $A/NK-A/CNK$  plot of the porphyries(after Maniar and Piccoli, 1989)

LILE/ HFSE 之间的解耦正是火山弧花岗岩的典型特征(Winter, 2001), 特别是 Ta 的负异常进一步反映了本区具有火山弧岩石典型的特征(Jahn *et al.*, 1999)。

#### 4.2.3 稀土元素

本区花岗质岩石的稀土元素分析结果列于表3, 3571 斑岩的稀土总含量( $\Sigma REE$ )为  $87.7 \times 10^{-6} \sim 105 \times 10^{-6}$ , 平均  $96.4 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 值为  $6.70 \sim 7.86$ ; 而莱历斯高尔斑岩的稀土总含量( $\Sigma REE$ )为  $105 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ , 平均  $141 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 值在  $6.58 \sim 8.92$  之间。总体来看, 本区稀土元素总量较低, 与地壳重熔型花岗岩(S型)的较高稀土元素含量明显不同(邱家骥, 1991), 暗示其成因可能属于地幔分异型(M型)或壳幔混合型(I型), 并且3571斑岩稀土总含量低于莱历斯高尔斑岩, LREE/HREE 值接近。

由稀土配分曲线(图7)来看, 两个斑岩体均具有轻稀土富集, 富大离子亲石元素, 呈明显的右倾型, 其中轻稀土分异明显, 而重稀土分异并不显著, 在稀土配分图上显示左陡( $(La/Sm)_N = 3.16 \sim 6.11$ ) 而右缓( $(Tb/Lu)_N = 1.05 \sim 1.55$ ) 的特征, 暗示它们可能是同一岩浆演化产物。另外, 本区样品的稀土配分曲线中 Eu 的负异常不太明显, 表明源区基本上不存在斜长石的残留, 同时3571斑岩  $\delta Eu$  值( $0.84 \sim 0.96$ ) 大于莱历斯高尔斑岩( $0.59 \sim 0.85$ ), 表明莱历斯高尔斑岩在低压条件下经历了一定程度的斜长石分离结晶作用。

#### 4.2.4 Sr-Nd 同位素

莱历斯高尔一带斑岩体的 Sr-Nd 同位素分析结果见表4, 其锶同位素初始值  $I_{Sr}$  总体较高, 且变化范围相对较小( $0.7079 \sim 0.7103$ ), 与一般的含铜金斑岩体的锶同位素初始值( $0.703 \sim 0.706$ ) 相比, 明显偏高(Sillitoe and Gappe, 1984; 芮宗瑶等, 1984, 2004)。其中3571铜矿斑岩体  $I_{Sr}$  为  $0.7085 \sim 0.7103$ , 莱历斯高尔钼矿斑岩体  $I_{Sr}$  在  $0.7079 \sim 0.7094$  之间, 平均  $0.7085$ , 较李华芹等(2006)所测定的锶同位素初始值(假定  $t = 350Ma$ )  $0.7095$  基本一致, 略有偏低。本区成矿斑岩体 Nd 同位素的初始值  $I_{Nd}$  变化范围为  $0.5120 \sim 0.5122$ ,

表3 莱历斯高尔一带斑岩微量元素、稀土元素测试结果 ( $\times 10^{-6}$ ) 及其有关参数Table 3 Composition of trace, REE elements ( $\times 10^{-6}$ ) and related parameters of the porphyries in the Lailisigao'er region

矿区 样品号	3571 铜矿		莱历斯高尔钼矿										
	D3-01	D7-3	D8-01	D9-02	D10-01	D12-01	D14-01	LLK-1	LLK-7	LLK-15	LLK-9	LLK-12	LLK-13
岩性	二长闪长斑岩						花岗闪长斑岩						
Sc	6.14	8.09	4.46	4.90	5.21	6.29	5.82	5.94	7.99	3.72	10.02	4.92	8.72
V	62.85	69.29	28.59	36.52	29.22	47.79	37.61	27.05	64.47	17.94	69.24	24.59	72.10
Cr	76.69	20.10	13.12	12.91	11.22	14.23	21.18	9.17	8.53	13.29	11.78	8.02	35.74
Mn	822.8	634.9	556.3	548.9	611.1	750.7	753.3	523.0	794.3	432.9	1060	556.5	1039
Co	11.02	7.39	5.47	7.26	5.28	5.33	5.16	4.93	5.31	4.68	22.59	1.98	9.96
Ni	30.78	30.02	6.02	6.00	5.14	5.96	14.34	4.63	5.88	6.19	9.45	3.04	7.26
Cu	515.3	22.65	222.8	1125	124.7	208.3	36.54	234.6	49.45	168.3	8017	90.90	1485
Zn	54.35	60.40	168.9	39.65	106.0	145.4	63.10	57.88	71.51	60.89	1662	39.87	220.0
Ga	10.89	20.27	19.36	20.57	23.19	17.92	20.85	22.26	23.20	17.25	20.12	19.12	23.75
Rb	32.62	217.2	114.6	146.4	114.0	132.3	175.7	184.7	189.4	164.0	149.0	166.5	120.9
Sr	67.64	147.0	244.1	152.1	270.5	373.9	357.0	301.7	190.6	190.0	281.0	186.9	435.0
Y	17.32	17.27	19.26	20.74	29.58	26.56	18.56	28.45	20.74	16.94	23.05	22.40	20.47
Zr	99.90	142.6	141.2	132.7	207.8	183.5	181.4	235.6	180.7	99.21	125.4	162.5	164.0
Nb	11.94	15.83	24.41	20.37	30.81	18.99	22.33	26.95	19.01	14.16	16.69	20.53	18.42
Mo	24.70	11.32	161.5	23.21	19.97	19.84	193.0	21.74	13.51	44.90	105.8	65.38	90.76
Cs	0.82	3.41	1.70	3.07	2.38	3.35	3.77	5.89	6.94	5.36	5.19	5.38	2.87
Ba	85.4	599	431	600	508	501	607	635	172	471	238	353	489
Hf	2.39	3.29	3.53	3.27	4.71	4.05	4.11	5.67	4.07	2.93	3.04	4.02	3.71
Ta	0.67	1.09	2.05	1.57	2.16	1.34	1.62	2.18	1.16	1.67	1.38	1.72	1.06
Pb	20.03	43.38	20.15	14.14	21.57	375.2	21.39	19.53	13.79	14.60	40.38	9.70	19.83
Th	5.89	8.92	14.30	13.15	13.91	11.30	15.22	16.70	5.49	9.53	5.84	13.34	6.21
U	1.90	2.53	5.58	2.81	2.96	2.27	2.28	4.57	1.90	2.06	1.91	1.97	2.62
Zr/Hf	41.88	43.39	40.00	40.62	44.16	45.35	44.16	41.55	44.40	33.87	41.21	40.42	44.18
Nb/Ta	17.86	14.56	11.92	12.96	14.24	14.13	13.79	12.34	16.35	8.51	12.08	11.94	17.32
La	16.91	20.72	23.14	31.18	40.33	28.32	25.89	43.06	29.17	22.00	22.02	30.82	26.45
Ce	34.54	43.19	52.98	57.90	80.67	59.30	49.81	84.65	56.54	43.35	47.62	59.96	52.69
Pr	4.12	4.94	5.31	6.65	9.08	6.84	5.60	9.39	6.42	4.96	5.71	6.80	6.14
Nd	16.35	19.21	19.30	24.11	33.42	25.52	20.48	34.73	24.50	18.47	22.03	25.20	23.35
Sm	3.46	3.92	3.92	4.64	6.65	5.71	3.96	6.53	4.80	3.69	4.45	4.98	4.52
Eu	0.95	1.19	0.89	0.87	1.24	1.35	1.06	1.44	1.06	0.91	1.04	1.12	1.24
Gd	3.34	3.56	3.56	4.06	5.97	4.99	3.62	5.89	4.35	3.39	4.33	4.49	4.27
Tb	0.50	0.53	0.55	0.62	0.91	0.76	0.55	0.88	0.65	0.52	0.68	0.66	0.62
Dy	3.09	3.13	3.50	3.87	5.48	4.61	3.25	5.38	3.93	3.18	4.28	4.10	3.80
Ho	0.62	0.62	0.68	0.75	1.04	0.87	0.64	1.08	0.77	0.64	0.88	0.82	0.76
Er	1.76	1.78	2.06	2.21	3.04	2.51	1.96	3.04	2.23	1.78	2.46	2.36	2.15
Tm	0.27	0.27	0.32	0.34	0.46	0.39	0.30	0.46	0.34	0.26	0.36	0.36	0.34
Yb	1.60	1.71	2.09	2.20	2.89	2.33	1.97	3.01	2.21	1.70	2.30	2.31	2.14
Lu	0.22	0.25	0.31	0.32	0.40	0.34	0.30	0.44	0.32	0.24	0.34	0.34	0.32
$\Sigma$ REE	87.73	105.01	118.63	139.71	191.59	143.86	119.39	199.96	137.27	105.07	118.49	144.33	128.79
LREE/HREE	6.70	7.86	8.07	8.73	8.48	7.56	8.49	8.92	8.28	7.98	6.58	8.35	7.94
$\delta$ Eu	0.84	0.96	0.71	0.60	0.59	0.76	0.84	0.70	0.69	0.71	0.71	0.85	0.77
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.12	1.25	1.12	1.20	1.21	1.24	1.22	1.21	1.22	1.16	1.04	1.21	1.19
(Tb/Lu) <sub>N</sub>	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04



表4 莱历斯高尔一带斑岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 4 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic analytic results of the porphyries in the Lailisigao'er region

矿区	样品号	岩性	Rb( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Sr( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$I_{\text{Sr}}$	$2\sigma$	Sm( $\times 10^{-6}$ )	Nd( $\times 10^{-6}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$	$I_{\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
3571 铜矿	D3-01	二长	31.03	1.352	66.47	0.715221	0.708486	11	3.328	15.85	0.1269	0.512288	11	0.511997	-3.71
	D7-02		230.0	3.099	215.1	0.725724	0.710282	11	4.198	20.34	0.1248	0.512355	1	0.512069	-2.30
莱历斯高尔铜矿	D8-01	二长	116.7	1.334	253.1	0.715128	0.708479	11	4.264	20.43	0.1262	0.512328	12	0.512038	-2.90
	D9-02		134.7	2.849	137.0	0.722366	0.708171	11	4.272	22.37	0.1155	0.512335	12	0.512070	-2.29
莱历斯高尔铜矿	D10-01	二长	108.1	1.216	257.5	0.714800	0.708743	11	6.381	31.83	0.1212	0.512353	11	0.512075	-2.19
	D12-01		128.8	0.972	383.9	0.712838	0.707997	11	5.698	25.25	0.1364	0.512469	14	0.512156	-0.61
莱历斯高尔铜矿	D14-01	二长	145.4	1.372	306.8	0.715771	0.708934	11	3.359	17.06	0.1190	0.512382	17	0.512109	-1.52
	LLK-1		175.5	1.874	271.2	0.717545	0.708206	11	5.832	30.61	0.1152	0.512301	12	0.512037	-2.94
莱历斯高尔铜矿	LLK-7	二长	174.4	2.742	184.3	0.723070	0.709410	11	3.544	16.92	0.1266	0.512441	11	0.512150	-0.72
	LLK-13		116.3	0.789	426.3	0.711789	0.707856	11	4.494	22.93	0.1185	0.512425	11	0.512153	-0.66

注: 计算样品的  $I_{\text{Sr}}$ ,  $I_{\text{Nd}}$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  都统一到  $t = 350\text{Ma}$ 。钼衰变常数  $\epsilon_{\text{Nb}} = 1.42 \times 10^{-11}$ ; 钐衰变常数  $\epsilon_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}$

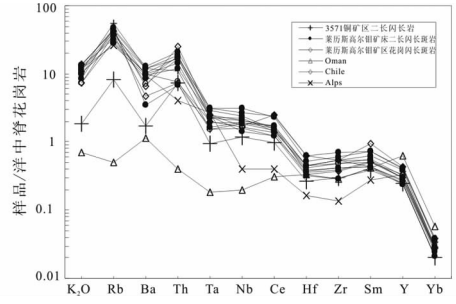


图6 不相容元素洋中脊花岗岩标准化曲线(洋中脊花岗岩值和其他地区数据引自 Pearce et al., 1984)

Fig. 6 ORG-normalized incompatible trace element patterns (ORG and other data content from Pearce et al., 1984)

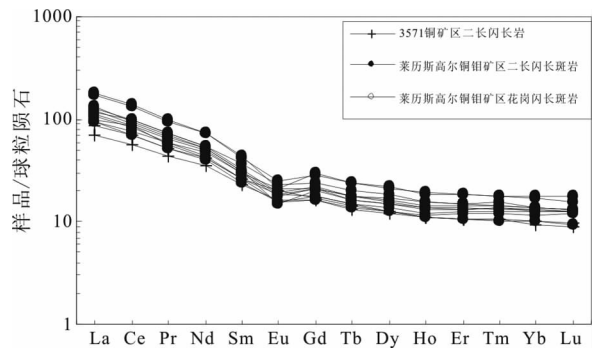


图7 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(球粒陨石值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (Normalized values from Sun and McDonough, 1989)

以 350Ma 计算得  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-0.61 \sim -3.71$ , 3571 铜矿斑岩体  $I_{\text{Nd}}$  为  $0.5120 \sim 0.5121$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为  $-2.30 \sim -3.71$ , 而莱历斯高尔铜矿斑岩体  $I_{\text{Nd}}$  在  $0.5120 \sim 0.5122$  之间, 平均  $0.5121$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  在  $-0.61 \sim -2.94$  之间。由上可看出, 整体上具有比原始地幔相对偏低  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  和偏高的  $I_{\text{Sr}}$ , 但比典型的地壳来源的花岗岩明显偏低的  $I_{\text{Sr}}$  值和高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值。另外, 两个斑岩体的锶同位素初始值基本上与大陆弧花岗岩接近, 而比岛弧环境的成矿斑岩体锶同位素要高, 后者一般为  $0.7038 \sim 0.7044$  (Karimpour and Atkinson, 1983)。

## 5 讨论

### 5.1 3571 斑岩和莱历斯高尔斑岩的形成时代

关于莱历斯高尔一带的成矿斑岩的年代学研究较少, 前人主要根据区域对比来推测其成矿时间可能发生在早古生代, 如: 刘德权等(1996)依据矿区所处的区域地质背景, 指出其成岩成矿的时间为志留纪。陈哲夫等(1997)根据出露于矿区北侧的虎斯特花岗岩闪长岩体锆石的 U-Pb 年龄  $415\text{Ma}$ , 提出莱历斯高尔一带的斑岩体与虎斯特花岗岩闪长岩体是岩

浆同期侵入的产物,即认为形成时间可能为加里东期。隗合明等(1999)根据西天山大地构造背景及其金属矿床在时间和空间上分布规律,提出莱历斯高尔斑岩铜钼矿形成时代可能在早古生代。王志良等(2004,2006)结合天山斑岩铜钼矿地质特征和时空分布规律,得出莱历斯高尔一带斑岩型铜钼矿床成矿时代为泥盆纪-石炭纪。本区侵入围岩大哈拉军山组第五岩性段陆相火山岩高精度锆石 SHRIMP 年龄  $363.2 \pm 5.7\text{Ma}$  (翟伟等,2006)。

本次笔者选用 3571 铜矿区和莱历斯高尔钼矿区的二长闪长斑岩体样品进行锆石 U-Pb 法定年,结果显示成岩年龄分别为  $354 \pm 0.65\text{Ma}$  和  $346 \pm 1.2\text{Ma}$ ,该年龄代表了 3571 和莱历斯高尔斑岩侵入体的形成时代,笔者推测 3571 斑岩体的形成年代应该与莱历斯高尔斑岩体的形成年代一致,说明其形成于早石炭世。相比李华芹等(2006)获得的莱历斯高尔斑岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄  $362 \pm 12\text{Ma}$  要晚 16Ma,而与其全岩 Rb-Sr 等时线年龄  $350 \pm 15\text{Ma}$  较为接近。然而,本次获得的年龄数据误差要小得多,因而可信度较高。

近年来,东、西天山的斑岩型铜矿已经积累了丰富的年代学资料,结果均表明其形成时代为海西晚期,但时代跨度较大。如西天山的达巴特铜矿区花岗斑岩的锆石进行了 SHRIMP 测年得其年龄为  $317 \pm 8\text{Ma}$  (张作衡等,2006);喇嘛苏铜矿区斜长花岗岩的 SHRIMP 锆石年龄为  $390.5 \pm 7.7\text{Ma}$  (Zhang *et al.*, 2008)。东天山的土屋-延东大型铜矿床的斜长花岗岩斑岩的单颗粒锆石 U-Pb 法定年年龄为  $360 \pm 7.8\text{Ma}$  (芮宗瑶等,2001);陈富文等(2005)通过对土屋和延东矿区的矿化斜长花岗岩斑岩体的年龄分别为  $334 \pm 3\text{Ma}$  和  $333 \pm 4\text{Ma}$ ;延东斜长花岗岩斑岩的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄为  $356 \pm 8\text{Ma}$  (秦克章等,2001);赤湖斑岩钼矿区矿化斜长花岗岩斑岩的锆石 SHRIMP-U-Pb 定年为  $322 \pm 10\text{Ma}$  (吴华等,2006)。这些年龄数据表明,东西天山斑岩型矿床的成矿斑岩的形成年代基本一致,并且已有的资料表明它们基本上都产生于晚古生代岛弧环境(王志良等,2004,2006),说明它们可能形成于相似的构造环境。

## 5.2 岩浆源区

冷成彪等(2007)通过对中国成矿斑岩体的统计和研究发现,中国的斑岩铜矿的源岩可能主要为下地壳岩石,少数可能为洋中脊玄武岩,并且受到中上地壳不同程度的混染。莱历斯高尔地区斑岩的稀土元素球粒陨石标准化图解(图7)只存在很弱的负 Eu 异常,说明其源区基本上没有斜长石的残留,这就可以排除了源区是上地壳泥质岩石或以斜长石为主的碎屑岩石的可能性。莱历斯高尔一带的 Sr 同位素初始值  $I_{\text{Sr}}$  (0.7079 ~ 0.7103) 和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (-0.61 ~ -3.76) 说明是壳幔混合源或者是下地壳来源。如果这些斑岩体是来自同一源区,那么其 Sr 和 Nd 同位素成分应该是均一的,但是,如前所述,两个地区的斑岩体的 Sr 和 Nd 同位素成分虽然变化范围不大,但还是有一定的变化,因此对其较为合

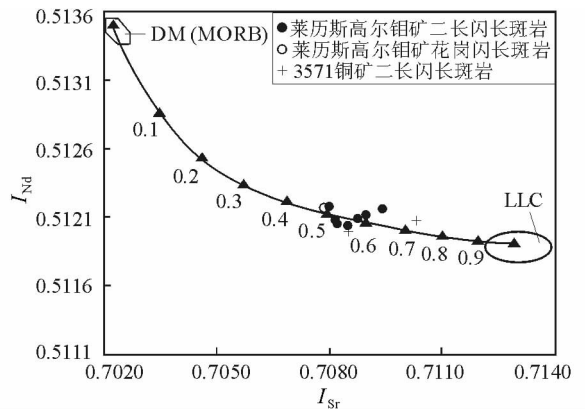


图8  $I_{\text{Sr}}-I_{\text{Nd}}$ 图解

Fig. 8  $I_{\text{Sr}}$  vs  $I_{\text{Nd}}$  diagram

理的解释是两个不同端元(地幔和地壳)的不同的比例混合造成的。对于大陆弧地区,地幔一般为已经熔出大量 MORB 的亏损软流圈地幔,而地壳则可以下地壳,也可以是上地壳。考虑到源区很少有斜长石的残留,所以推测是下地壳的基性岩石。据以上分析,为了对本区斑岩体的壳-幔物质贡献有一个半定量的了解,笔者依据 Sr-Nd 同位素分析结果,假设以 MORB 型亏损地幔的 Sr-Nd 同位素含量为亏损地幔端元(Sr、Nd 含量分别设为  $200 \times 10^{-6}$ 、 $0.738 \times 10^{-6}$ ,初始值  $I_{\text{Sr}}$  和  $I_{\text{Nd}}$  分别设为 0.7022 和 0.5135),取本区前寒武纪基底花岗片麻岩为地壳端元,其 Sr、Nd、初始值  $I_{\text{Sr}}$  和  $I_{\text{Nd}}$  含量取其平均值,分别为  $229.4 \times 10^{-6}$ 、 $4.47 \times 10^{-6}$ 、0.7129 和 0.5119 (统一校正到 350Ma) (Chen *et al.*, 2000),利用 Faure (1986) 提出的同位素混合模型,可以估算出不同端元对源区的贡献。由  $I_{\text{Sr}}-I_{\text{Nd}}$  图解(图8)可知本区斑岩体地壳物质所占的百分比为 50% ~ 70%,所以成岩物质主要来自地壳,并且 3571 铜矿斑岩体受到地壳混染的程度比莱历斯高尔钼矿斑岩体略高。

## 5.3 构造环境

本区斑岩体以二长闪长斑岩和花岗闪长斑岩为主,皆含有不等量的角闪石和榴石,与 Barbarin (1999) 所划分的岛弧富含角闪石钙碱性花岗岩的矿物组合一致。主要元素研究表明,3571 铜矿和莱历斯高尔钼矿的斑岩体是同源岩浆分异演化的产物;特别是  $\text{FeO}^{\text{T}}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量随  $\text{SiO}_2$  含量增加而呈线性降低,显示具有典型钙碱性岩系的演化特征 (Chappell and White, 1992)。在花岗岩类的  $(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})-\text{CaO}$  判别图解(图略)中,本区花岗质岩石主要落在 IAG + CAG + CCG (岛弧花岗岩 + 大陆弧花岗岩 + 大陆碰撞花岗岩)区,而与 POG (造山后花岗岩)、RRG + CEUG (与裂谷有关的花岗岩 + 与陆内隆升有关的花岗岩)明显不同。由微量元素的特征可知,3571 铜矿和莱历斯高尔钼矿成矿斑岩体可能是同一源区岩浆演化而来,并具有火山弧花岗岩的典型特征。根据微量

元素含量在花岗岩构造环境判别图解中显示(图略), 莱历斯高尔一带含矿斑岩样品几乎全部落在火山弧花岗岩区内, 个别样品位于板内花岗岩区, 显示本区主要位于靠近大陆缘的岛弧环境, 在斑岩体的形成过程中也有来自板内物质的贡献。

在洋脊花岗岩标准化图解上(图6), 研究区的两个斑岩与典型的大陆弧花岗岩类(Chile)比较相似, 而与碰撞型(Italian Alps)和岛弧花岗岩类(Oman)有明显的区别, 因此, 莱历斯高尔斑岩一带成矿斑岩体可能形成于大陆弧环境, 而既不是碰撞造山环境, 也不是大洋岛弧环境。

根据以上分析, 结合区域地质资料, 本区的构造演化推测如下:

在新疆北部, 古中亚洋的裂解扩张有由北向南逐渐推移的趋势(Qin *et al.*, 2002), 并且可能具有双向的俯冲特征(朱永峰, 2004; 张招崇等, 2007; 徐新等, 2007)。在中晚寒武世-奥陶纪期间, 准噶尔板块和伊犁板块发生分离, 形成准噶尔洋。奥陶纪-志留纪, 准噶尔洋板块向北俯冲到西伯利亚板块之下, 形成阿尔泰加里东岛弧; 向南俯冲到伊犁地块之下, 在赛里木-博罗科洛一带形成早古生代岛弧带(张良臣和吴乃元, 1985; 肖序常等, 1992; 王志良等, 2004)。泥盆纪-石炭纪期间, 准噶尔洋板块继续向西伯利亚板块之下俯冲, 形成了南阿尔泰成熟岛弧; 另一侧则继续向伊犁板块俯冲, 形成一个完整的晚古生代沟-弧-盆体系, 即依连哈巴尔晚古生代弧前-海沟带、别珍套-科古琴晚古生代岛弧带和吐拉苏晚古生代弧后盆地。

结合区域地质特征和在该晚古生代岛弧带所发现的斑岩铜钼矿床的地质特征, 笔者推测莱历斯高尔一带铜钼矿床成矿机制与晚古生代准噶尔洋板块俯冲作用有着密切的关系: 当准噶尔洋板块在晚古生代向伊犁板块俯冲时, 形成别珍套-科古琴晚古生代岛弧带, 俯冲洋壳发生局部熔融, 在熔融过程中同时析出金属, 并且可能是因为在挤压背景下由于板块之间作用方式的调整而产生的短时间张性环境, 致使深部含矿岩浆沿深大断裂的上升侵位(夏斌等, 2000; 张洪涛等, 2004), 在斑岩体顶部富集成矿。

#### 5.4 找矿意义

前已述及, 莱历斯高尔一带的成矿地质背景以及含矿斑岩的地球化学特征均与产于大陆弧或活动大陆边缘的斑岩型矿床类似。罗铭玖(1992)曾较系统的总结过国内数百个含矿斑岩体, 发现一般的含矿斑岩体的  $\text{SiO}_2$  含量为 62.7% ~ 64.1%,  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量在 4.69% ~ 9.21% 之间,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为 0.92 ~ 1.12,  $\text{A}/\text{CNK} < 1.3$ ; 而研究区内除个别样品(D3-1)可能因蚀变影响导致  $\text{SiO}_2$  的升高, 其余样品中  $\text{SiO}_2$  含量变化 58.49% ~ 70.31% 之间,  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量在 4.96% ~ 8.24% 之间,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为 0.75 ~ 1.95,  $\text{A}/\text{CNK} < 1.33$ 。因此本区含矿斑岩与国内其他地区含矿斑岩有很大的相似性, 属于含矿岩体。

由本区年代学、地球化学特征可知, 3571 铜矿和莱历斯高尔钼矿斑岩的形成时代一致, 并且其相似的地球化学特征更是说明了它们具有同源性, 笔者推测 3571 岩体相当于莱历斯高尔岩体的浅部(前者只出露少量露头, 剥蚀程度很浅, 而后者可能是由于剥蚀程度较高而出露面积较大), 因而其深部可能存在类似于莱历斯高尔的钼矿。

## 6 结论

(1) 3571 铜矿和莱历斯高尔钼矿成矿斑岩的锆石 LA-ICP-MS 定年结果为  $354 \pm 0.65\text{Ma}$  和  $346 \pm 1.2\text{Ma}$ , 表明其应属于同期次侵入的, 属于早石炭世;

(2) 莱历斯高尔一带成矿斑岩体组合以二长闪长斑岩和花岗闪长斑岩为主, 岩石地球化学特征表明莱历斯高尔一带成矿斑岩体为同源岩浆分异演化的产物, 具有典型钙碱性岩系火山弧花岗岩的演化特征, 形成于大陆弧环境, 成岩物质主要来源于地壳, 并有少量地幔物质的混入, 其成因与晚古生代准噶尔洋板块俯冲作用有关。

**致谢** 本文工作得到新疆地矿局第六地质大队邓洪涛副总工程师的帮助, 并且在论文数据的分析过程中得到西北大学大陆动力学国家重点实验室、中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室、中国地质大学(北京)地学实验中心等相关老师的帮助和指导, 以及朱永峰教授、张作衡研究员对稿件提出了宝贵的修改意见, 在此向他们表示诚挚的感谢!

## References

- Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chem. Geol.*, 192: 59 - 79
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605 - 626
- Chappell BW and White AIB. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 83: 1 - 26
- Chen FW, Li HQ, Chen YC, Wang DH, Wang JL, Liu DQ, Tang YL and Zhou RH. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological significance of mineralization in Tuwu-Yandong porphyry copper mine, eastern Tianshan Mountain. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 256 - 260 (in Chinese with English abstract)
- Chen JF, Zhou TX, Xie Z, Zhang X and Guo XS. 2000. Formation of positive  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  granitoids from the Alataw Mountains, Xinjiang, China, by mixing and fractional crystallization: Implication for Phanerozoic crustal growth. *Tectonophysics*, 328(1-2): 53 - 67
- Chen ZF, Wang SD and Liang YH. 1997. Opening-Closing Tectonics and Mineralization in Xinjiang. Urumqi: Science Technology and Hygiene Publishing House, 121 - 156 (in Chinese with English abstract)
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology*. 2<sup>nd</sup> edition. New York: John Wiley and Sons, 1 - 247
- Gao S, Liu XM, Yuan HL, Hattendorf B, Gunther D, Chen L and Hu SH. 2002. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICP-MS. *Geostand Newsl.*, 22: 181

- 195

- Han YG, Zhang SH, Franco PJ and Zhang YH. 2007. Evolution of the Mesozoic granites in the Xiong'er-shan-Waifangshan region, western Henan Province, China, and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 253–265
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27–55
- Huang X and Wu LR. 1990. Nd and Sr isotopes of granitoids from Shaanxi Province and their significance for tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 6(2): 1–11 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Wu FY and Lo CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic ultramafic intrusions of the northern Dabie complex central China. *Chem. Geol.*, 157(1–2): 119–146
- Karimpour MH and Atkinson WW. 1983. Petrogenesis of the A. O. porphyry copper complex in Jackson and Grand Counties, northwestern Colorado. *Global Tectonics and Metallogeny*, 2(1–2): 15–27
- Leng CB, Zhang XC, Chen YJ, Wang SX, Gou TZ and Chen W. 2007. Discussion on the relationship between Chinese porphyry copper deposits and adakitic rocks. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 199–210 (in Chinese with English abstract)
- Li HQ, Wang DH, Wan Q, Qu WJ, Zhang B, Lu YF, Mei YP and Zou SL. 2006. Isotopic geochronology study and its significance of the Lailisigao'er Mo deposit, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2437–2443 (in Chinese with English abstract)
- Liati A, Gebauer D and Wysoczanski R. 2002. U-Pb SHRIMP -dating of zircon domains from UHP garnet-rich mafic rocks and late pegmatoids in the Rhodope zone (N Greece): Evidence for Early Cretaceous crystallization and Late Cretaceous metamorphism. *Chemical Geology*, 184(3–4): 281–299
- Liu DQ, Tang YL and Zhou RH. 1996. Minerogenic Series in Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 117–126 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex. Version 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1–70
- Luo MJ. 1992. The Molybdenum Deposit in China. Zhengzhou: Henan Science and technology Press, 1–452 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635–643
- Morrison GW. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13(1): 97–108
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956–983
- Qin KZ, Fang TH, Wang SL and Wang XD. 2001. Discovery of the Kalatage Cu-Au mineralized district and its prospecting potentiality, Paleozoic window at the south margin of the Tu-ha Basin. *Chinese Geology*, 28(3): 16–23 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Sun S, Li JL, Wang SL and Liu W. 2002. Paleozoic epithermal Au and porphyry Cu deposit in North Xinjiang, China: Epochs, features, tectonic linkage and exploration significance. *Resource Geology*, 52(4): 291–300
- Qiu JX. 1991. Applied Magma Petrology. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House, 225–248 (in Chinese with English abstract)
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of minor elements. *Lithos*, 22: 247–263
- Rollinson HR. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. England: Longman Scientific & Technical, Harlow, 1–352
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM microprobe: Some examples from the western Alps. *Cathodoluminescence in Geoscience*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 373–400
- 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
- Rui ZY, Huang CK, Qi GM, Wang J and Zhang HT. 1984. The Porphyry Cu (Mo) Deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 350 (in Chinese with English abstract)
- Rui ZY, Wang FT, Li HH, Dong LH, Wang L, Jiang LF, Liu YL, Wang LS and Chen WS. 2001. Advance of the porphyry copper belt of the eastern Tianshan Mountain, Xinjiang. *Chinese Geology*, 28(2): 11–16 (in Chinese with English abstract)
- Rui ZY, Zhang LS, Chen ZY, Wang LS, Liu YL and Wang YT. 2004. Discussion on the source rock or area of porphyry copper deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 229–238 (in Chinese with English abstract)
- Sillitoe RH and Gappe IM. 1984. Philippine porphyry copper deposits: Geologic setting and characteristics. *Commun Coordination Joint Prosp. (CCOP)/Tech. Pub. (TP)*, 14: 78–89
- Sun SS and McDonoug WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. London: Geological Society Special Publications, 42: 313–345
- Wang ZL, Mao JW, Zhang ZH, Zuo GZ and Wang LS. 2004. Types, characteristics and metallogenic evolution of the Paleozoic polymetallic copper-gold deposits in the western Tianshan Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 836–847 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZL, Mao JW, Zhang ZH, Zuo GZ and Wang LS. 2006. Geology, time-space distribution and metallogenic geodynamic evolution of porphyry copper (molybdenum) deposits in the Tianshan Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 943–955 (in Chinese with English abstract)
- Wei HM, Wang QQ and Ning XC. 1999. Relationship between tectonics and mineralization in the northern part of western Tianshan and its application to ore prospecting. *Journal of Xi'an Engineering University*, 21(4): 14–21 (in Chinese with English abstract)
- Winter JD. 2001. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. New Jersey: Prince Hall, 1–697
- Wu H, Li HQ, Chen FW, Lu YF, Deng G, Mei YP and Ji HG. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of plagiogranite porphyry in the Chihu molybdenum-copper district, Hami, East Tianshan Mountain. *Geological Bulletin of China*, 25(5): 549–552 (in Chinese with English abstract)
- Xia B, Tu GZ, Chen GW and Yu XX. 2000. The metallogenic setting of global superlarge porphyry copper deposits. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 406–408 (in Chinese with English abstract)
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JT and Zhao M. 1992. Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 1–169 (in Chinese with English abstract)
- Xu X, Zhu YF and Chen F. 2007. Petrology of the Kamste ophiolite mélange from East Junggar, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1603–1610 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. Precise determinations of U-Pb age and trace and rare element concentrations of zircons by excimer LA-ICP-MS of Cenozoic intrusion in Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511–1520 (in Chinese)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Gther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geoanalytical and Geostandard Research*, 28(3): 353–370
- Zhai W, Sun XM, Gao J, He XP, Liang JL, Miao LC and Wu YL. 2006. SHRIMP dating of zircons from volcanic host rocks of Dahalajunshan Formation in Axi gold deposit, Xinjiang, China, and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1399–

1404 (in Chinese with English abstract)

- Zhang HT, Chen RY and Han FL. 2004. Reunderstanding of metallogenetic geological conditions of porphyry copper deposits in China. *Mineral Deposits*, 23 (2): 150 - 163 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC and Wu NY. 1985. The geotectonics and its evolution of Tianshan. *Xinjiang Geology*, 3(3): 1 - 14 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Zhou G, Yan SH, Chen BL, Huo YK, Cai FM and He LX. 2007. Geology and geochemistry of the Late Paleozoic volcanic rocks of the south margin of the Altai Mountains and implications for tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica*, 81 (3): 344 - 358 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZH, Mao JW, Wang ZL, Du AD, Zuo GH, Wang LS, Wang JW and Qu WJ. 2006. Geology and metallogenetic epoch of the Dabate porphyry copper deposit in West Tianshan Mountains, Xinjiang. *Geological Review*, 52 (5): 683 - 688 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZH, Wang ZL, Wang LS and Zuo GC. 2008. Metallogenetic epoch and ore-forming environment of the Lamasu skarn-porphyrific Cu-Zn deposit, western Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 731 - 740
- Zhu YF. 2004. Ductile shear zone related gold deposits in craton and Paleozoic orogenic belt: An analysis of their ore forming processes and environments. *Mineral deposits*, 23(4): 509 - 519 (in Chinese with English abstract)
- Zuo GZ, Zhang ZH, Wang ZL, Liu M and Wang LS. 2008. Tectonic division, stratigraphical system and the evolution of western Tianshan Mountains, Xinjiang. *Geological Review*, 54 (6): 748 - 767 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 陈富文, 李华芹, 陈毓川, 王登红, 王金良, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2005. 东天山土屋-延东斑岩铜矿田成矿时代精确测定及其地质意义. *地质学报*, 79(2): 256 - 260
- 陈哲夫, 成守德, 梁云海. 1997. 新疆开合构造与成矿. 乌鲁木齐: 科技卫生出版社, 121 - 156
- 黄萱, 吴利仁. 1990. 陕西地区岩浆岩 Nd, Sr 同位素特征及其与大地构造发展的联系. *岩石学报*, 6(2): 1 - 11
- 冷成彪, 张兴春, 陈衍景, 王守旭, 苟体忠, 陈伟. 2007. 中国斑岩铜矿与埃达克(质)岩关系探讨. *地学前缘*, 14(5): 199 - 210
- 李华芹, 王登红, 万澜, 屈文俊, 张兵, 路远发, 梅玉萍, 邹绍利. 2006. 新疆莱历斯高尔铜钼矿的同位素年代学研究. *岩石学报*, 22 (10): 2437 - 2443
- 刘德权, 唐延玲, 周汝洪. 1996. 中国新疆矿床成矿系列. 北京: 地质出版社, 117 - 126
- 罗铭玖. 1992. 中国钼矿床. 郑州: 河南科学技术出版社, 1 - 452
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 王旭东. 2001. 吐哈盆地南缘古生代“天窗”卡拉塔格铜金矿化区的发现及其成矿潜力. *中国地质*, 28 (3): 16 - 23
- 邱家骥. 1991. 应用岩浆岩岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 225 - 248

- 芮宗瑶, 黄崇钊, 齐国明, 徐珏, 张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京: 地质出版社, 1 - 350
- 芮宗瑶, 王福同, 李恒海, 董连慧, 王磊, 姜立丰, 刘玉琳, 王龙生, 陈伟十. 2001. 新疆东天山斑岩铜矿带的新进展. *中国地质*, 28 (2): 11 - 16
- 芮宗瑶, 张立生, 陈振宇, 王龙生, 刘玉琳, 王义天. 2004. 斑岩铜矿的源岩或源区探讨. *岩石学报*, 20(2): 229 - 238
- 王志良, 毛景文, 张作衡, 左国朝, 王龙生. 2004. 西天山古生代铜金多金属矿床类型、特征及其成矿地球动力学演化. *地质学报*, 78 (6): 836 - 847
- 王志良, 毛景文, 张作衡, 左国朝, 王龙生. 2006. 新疆天山斑岩铜矿地质特征、时空分布及其成矿地球动力学演化. *地质学报*, 80 (7): 943 - 955
- 魏合明, 王全庆, 宁晰春. 1999. 西天山北部大地构造背景与成矿关系及找矿预测. *西安工程学院学报*, 21(4): 14 - 21
- 吴华, 李华芹, 陈富文, 路远发, 邓岗, 梅玉萍, 姬后贵. 2006. 东天山哈密地区赤湖钼铜矿区斜长花岗岩斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. *地质通报*, 25(5): 549 - 552
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦铁, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1 - 169
- 夏斌, 涂光炽, 陈根文, 喻享祥. 2000. 超大型斑岩铜矿床形成的全球地质背景. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 406 - 408
- 徐新, 朱永峰, 陈博. 2007. 卡姆斯特蛇绿混杂岩的岩石学研究及其地质意义. *岩石学报*, 23(7): 1603 - 1610
- 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
- 翟伟, 孙晓明, 高俊, 贺小平, 梁金龙, 苗来成, 吴有良. 2006. 新疆阿希金矿床赋矿围岩-大哈拉山组火山岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义. *岩石学报*, 22(5): 1399 - 1404
- 张良臣, 吴乃元. 1985. 天山地质构造及演化史. *新疆地质*, 3(3): 1 - 14
- 张洪涛, 陈仁义, 韩芳林. 2004. 重新认识中国斑岩铜矿的成矿地质条件. *矿床地质*, 23(2): 150 - 163
- 张招崇, 周刚, 闫升好, 陈柏林, 贺永康, 柴凤梅, 何立新. 2007. 阿尔泰山南缘晚古生代火山岩的地质地球化学特征及其对构造演化的启示. *地质学报*, 81(3): 344 - 358
- 张作衡, 毛景文, 王志良, 杜安道, 左国朝, 王龙生, 王见隹, 屈文俊. 2006. 新疆西天山达巴特铜矿床地质特征和成矿时代研究. *地质论评*, 52(5): 683 - 688
- 朱永峰. 2004. 古老克拉通和古生代造山带中的韧性剪切带型金矿: 金矿成矿条件与成矿环境分析. *矿床地质*, 23(4): 509 - 519
- 左国朝, 张作衡, 王志良, 刘敏, 王龙生. 2008. 新疆西天山地区构造单元划分、地层系统及其构造演化. *地质论评*, 54(6): 748 - 767