

文章编号: 0258-7106 (2024) 05-1095-16

Doi: 10.16111/j.0258-7106.2024.05.009

# 陕西池沟 Cu-Mo 矿床新发现花岗岩脉的年代学研究 及其地质意义\*

李照义<sup>1,2</sup>, 谢桂青<sup>1,3,4\*\*</sup>, 任 涛<sup>5</sup>, 刘 凯<sup>5</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与评价重点实验室, 北京 100037; 2 河南省地质研究院, 河南 郑州 450016; 3 自然资源部战略性金属矿产找矿理论与技术重点实验室, 北京 100083; 4 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 5 商洛西北有色七一三总队有限公司, 陕西 商洛 726000)

**摘要** 池沟是近年在东秦岭成矿带发现为数不多的中型斑岩-矽卡岩铜钼矿床, 初步研究表明浅部铜矿体与晚中生代闪长质岩浆有关, 但是否存在同一岩浆事件的不同演化阶段岩浆和相关矿化还不清楚。最近, 矿区北部开展深钻孔 ZK701(1615 m), 在标高约 573 m 和 -558 m 均发现多层铜矿体和细粒花岗岩脉, 矿体主要产于岩脉接触带的矽卡岩中。文章选择新揭露的细粒花岗岩开展锆石 U-Pb 定年和微量元素分析, 并对矽卡岩中的代表性矿物进行 EMPA 成分分析。结果显示, 池沟地区发育钙铁榴石(And<sub>86-94</sub>Gro<sub>0-8</sub>)+透辉石(Di<sub>60-72</sub>Hd<sub>26-38</sub>)的矿物组合, 暗示其形成于氧化条件。细粒花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为(146.3±5.7)Ma, 与石英闪长斑岩成岩年龄接近, 并发育早古生代和新元古代捕获锆石。锆石微量元素计算获得  $\Delta\text{FMQ}=0.8\sim1.0$  和  $\text{Eu}_N/\text{Eu}_{N^*}>0.4$ , 暗示细粒花岗岩具有高氧逸度和含水量。通过综合研究, 文章认为细粒花岗岩具有成铜潜力, 并与石英闪长斑岩构成多阶段成岩成矿, 推测该区具有形成大型铜矿的潜力。

**关键词** 斑岩-矽卡岩铜矿; 细粒花岗岩脉; 成矿作用; 池沟矿床; 东秦岭

中图分类号:P618.41; P618.65

文献标志码:A

## Geochronology and geological significance of newly discovered granitoid dikes in Chigou Cu-Mo deposit, Shaanxi Province

LI ZhaoYi<sup>1,2</sup>, XIE GuiQing<sup>1,3,4</sup>, REN Tao<sup>5</sup> and LIU Kai<sup>5</sup>

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;  
2 Henan Academy of Geology, Zhengzhou 450016, Henan, China; 3 MNR Key Laboratory for Exploration Theory & Technology of Critical Mineral Resources, Beijing 100083, China; 4 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5 No.713 Party of Northwest Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals, Shangluo 726000, Shaanxi, China)

### Abstract

Chigou is one of the few medium-sized porphyry-skarn copper deposits recently discovered in the East Qinling metallogenic belt. Previous studies suggested that the shallow copper orebodies are genetically related to the Late Mesozoic dioritic magma, and it is unclear whether there are multiple stages of magmatism and mineralization. Recently, a deep drill hole ZK701 (1615 m) discovers numerous Cu orebodies and granitoid dikes around elevations of 573 m and -558 m in the northern part of the mining area. The orebodies are mainly hosted in the skarn contact zone around the fine-grained granite dikes. This paper chooses the fine-grained granite and skarn minerals for EMPA, zircon U-Pb dating and trace element analysis. The results indicate that the prograde skarns

\* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41925011)资助

第一作者简介 李照义,男,1993年生,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: lizhaoyi0716@163.com

\*\* 通讯作者 谢桂青,男,1975年生,研究员,博士生导师,从事矿床模型与找矿预测研究。Email: xieguiping@cugb.edu.cn

收稿日期 2023-12-19; 改回日期 2024-06-09。赵海杰编辑。

consist of andradite ( $\text{And}_{86-94}\text{Gro}_{0-8}$ ) $+$ diopside ( $\text{Di}_{60-72}\text{Hd}_{26-38}$ ), suggesting an oxidizing formation state. The zircon U-Pb age of fine-grained granite is  $(146.3\pm5.7)$  Ma, which is close to the age of quartz diorite porphyry, and the Early Paleozoic and Neoproterozoic inherited zircons are developed. The calculation of zircon trace elements shows that  $\Delta\text{FMQ}=0.8\sim1.0$  and  $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*>0.4$ , suggesting the high oxygen fugacity and water content of fine-grained granite. Through comprehensive research, this paper proposes that fine-grained granite has the potential for copper, and forms multi-stage diagenesis and mineralization with quartz diorite porphyry, so the Chigou has the possibility of discovering larger-scale copper deposit.

**Key words:** porphyry-skarn copper ore, fine-grained granite dikes, mineralization, Chigou deposit, East Qinling

斑岩-矽卡岩铜矿床是产于中酸性侵入岩及其内外接触带附近的岩浆热液矿床,迄今为止为全球提供了超过 75% Cu、50% Mo 和 20% Au 的资源储量 (Meinert et al., 2005; Sillitoe, 2010)。经典的成矿理论是基于俯冲带岩浆弧环境斑岩铜矿床建立起来的 (Lowell et al., 1970; Sillitoe, 1997)。近年来的研究表明,斑岩-矽卡岩铜矿床还可以产于与俯冲直接无关的非弧环境(如冈底斯和东秦岭成矿带; Chang et al., 2019; 侯增谦等, 2020; Chen et al., 2022)。斑岩-矽卡岩矿床通常具有多阶段性成矿特征 (Yang et al., 2016),许多斑岩矿床的金属富集和沉淀是多阶段岩浆作用的结果,叠加成矿作用包括不同岩浆成矿事件的叠加和同一成矿事件中持续性、周期性的多阶段岩浆 (Hong et al., 2021)。因此,精确厘定不同类型岩浆和相关成矿事件,具有重要的科学价值和实践意义。

东秦岭造山带是由华北板块和扬子板块经历了长期多期的俯冲-碰撞-伸展作用所形成的叠合型造山带(图 1a),同时是中国重要的 Mo-Au-Pb-Zn 为主的多金属成矿带 (Mao et al., 2008; Wu et al., 2013; 张国伟等, 2019)。其中,斑岩-矽卡岩钼矿床和脉状金矿床是最重要的 2 类矿床 (Mao et al., 2002; Cao et al., 2017)。秦岭经历了 3 个主要的构造演化阶段,分别为新元古代基底形成阶段、古生代主造山带构造演化阶段和中生代的陆内演化阶段 (张国伟, 2001)。其中,已探明的超大型-大型钼矿床主要与中生代岩浆活动密切相关,主要发育 233~221 Ma、148~138 Ma 和 131~112 Ma 三期成矿事件 (卢欣祥等, 2002; Mao et al., 2008)。近年来,在南秦岭柞水-山阳地区发现了与多个中小型规模斑岩-矽卡岩型 Cu 多金属矿床,已有的年龄集中在 140~150 Ma,包括池沟、小河口、冷水沟、双元沟等矿床(图 1b; 谢桂青等, 2012; 陈雷等, 2014),形成于构造体制转换导致的陆内伸展环境 (Chen et al., 2022)。

池沟是柞水-山阳矿集区新发现的中型规模斑岩-矽卡岩型铜钼矿床(图 2),预测矿石量和铜平均品位分别为 63.6 Mt 和 0.22%(任涛等, 2014)。矿区内存有多个小岩体和岩脉,在地表主要出露黑云二长花岗岩和石英闪长斑岩(图 2)。黑云二长花岗岩主要出露在矿区南部,发育钼铜矿化,其锆石 U-Pb 年龄为 146 Ma(Xie et al., 2015)。石英闪长斑岩主要发育在北部地表,呈多个岩脉和透镜体产出,主要发育以铜钼为主的矿化,其成岩年龄约 145 Ma(谢桂青等, 2012)。对石英闪长斑岩岩体中与黄铜矿共生的辉钼矿 Re-Os 定年,将其铜钼成矿年龄限定在 148 Ma 左右(任涛等, 2014)。根据年代学、同位素地球化学等初步研究,研究认为钼矿主要与黑云二长花岗岩相关;而铜矿形成与石英闪长斑岩密切相关(王瑞廷等, 2008; 谢桂青等, 2012; 任涛等, 2014; Zhang et al., 2020)。近年,池沟矿区北部实施较深的钻孔(ZK701, 1615 m),发现了多层铜矿体和新的细粒花岗岩脉(图 3)。细粒花岗岩脉与石英闪长斑岩、黑云二长花岗岩没有明显的空间接触关系,与成矿的成因关系尚不清楚。本文以池沟矿区新发现的花岗岩脉和矿化为研究对象,在岩相学工作的基础上,利用电子探针(EMPA)、锆石 U-Pb 和微量元素特征,厘定其成岩年龄和岩体性质,提出矿床存在多阶段岩浆成矿作用。

## 1 区域地质背景

东秦岭造山带由北向南依次为华北板块南缘、北秦岭、南秦岭和扬子板块北缘,分别由褒川断裂带、商丹断裂带和勉略缝合带划分 (Meng et al., 1999; Dong et al., 2011; Wu et al., 2013)。南秦岭由前寒武纪结晶基底和上覆火山沉积盖层组成,其中包括前寒武纪火山沉积岩、震旦纪—奥陶纪和泥盆纪—石炭纪碳酸盐、页岩和砂岩,具有一系列向南

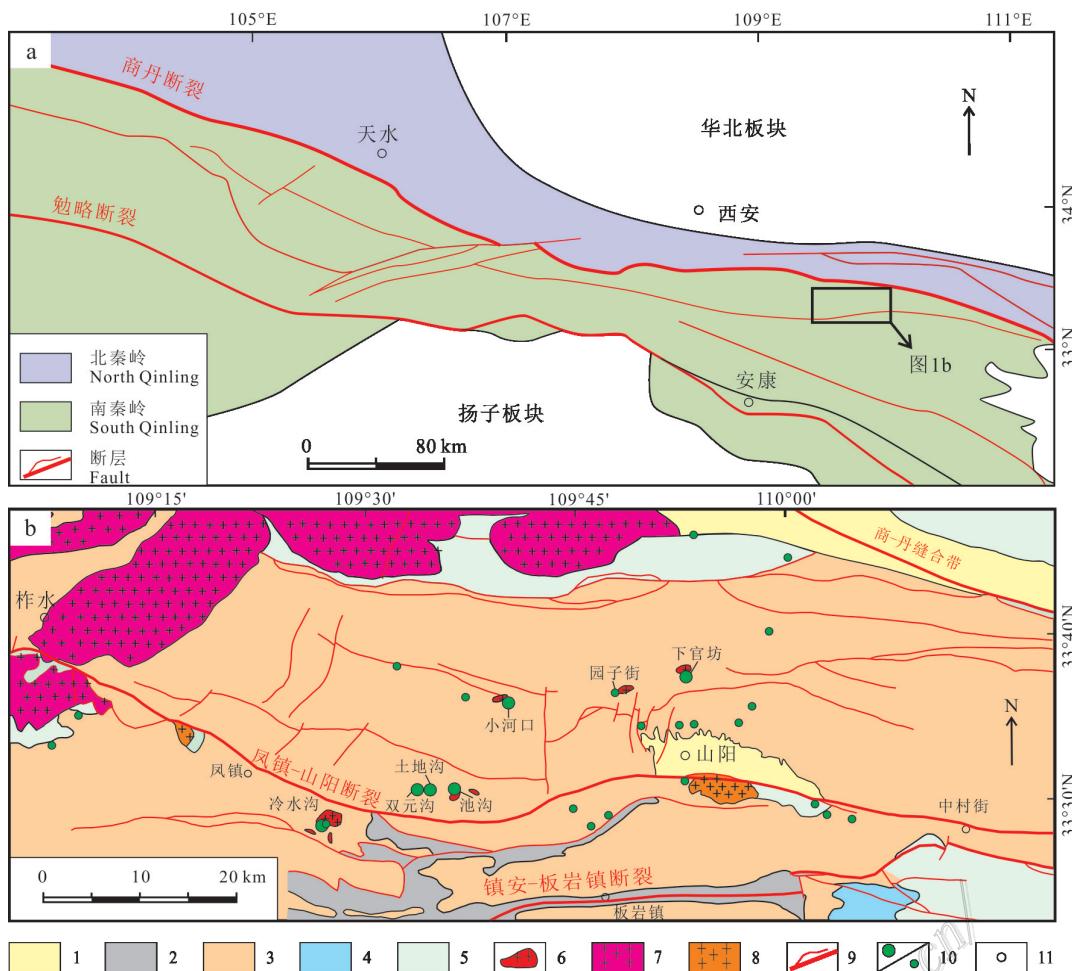


图1 秦岭造山带区域地质图(a)及柞水-山阳矿集区铜矿床(点)分布图(b,据Xie et al., 2015; 2017; Chen et al., 2022修改)

1—第四系;2—石炭系;3—泥盆系;4—志留系;5—元古界;6—晚侏罗世—早白垩世花岗岩;7—晚三叠世花岗岩;8—新元古代花岗岩;  
9—断层;10—铜矿点;11—地名

Fig. 1 Geological map of the Qinling orogenic belt region (a) and distribution map of copper deposits in the Zhashui-Shanyang mining district (b, modified from Xie et al., 2015; 2017; Chen et al., 2022)

1—Quaternary; 2—Carboniferous; 3—Devonian; 4—Silurian; 5—Proterozoic; 6—Late Jurassic—Early Cretaceous granites; 7—Late Triassic granites; 8—Neoproterozoic granites; 9—Faults; 10—Copper deposits; 11—Place name

的叠瓦状逆冲褶皱体系(Gao et al., 1995; Meng et al., 2000)。南秦岭构造带柞水-山阳盆地内地层为一套泥岩、碎屑岩及少量碳酸盐岩沉积的复理石建造(图1b),以泥盆系和石炭系碳酸盐、页岩和砂岩为主,志留系和前寒武系出露较少(王宗起等,2009)。泥盆系和石炭系为滨海碳酸盐、页岩和砂岩形成于弧前盆地,经历了绿片岩相变质作用。该区南发育凤镇-山阳断裂,是1条由NS向逆冲推覆与近EW向走滑剪切叠加形成的大型断层,区北为多条EW向的断层,被NS、NNE向左行走滑断层所切割(吴发富等,2014)。这些断裂具有多期活动特征,控制了柞山矿集区的构造、岩浆和成矿作用

(图1b)。

岩浆活动在柞水-山阳矿集区普遍发育,主要分为新元古代、早中生代和晚中生代3期岩浆事件(吴发富等,2014; Li et al., 2015; Xie et al., 2017)。少量新元古代岩浆发育在凤镇-山阳断裂南侧,以闪长岩+钠长岩+花岗岩组合为主(Xie et al., 2017)。早中生代岩浆主要分布在矿集区的西部和北部,主要为黑云母二长花岗岩-石英二长岩-二长花岗岩组合(弓虎军等,2009)。晚中生代岩浆以小岩体或者岩枝形式出露在矿集区的中部,单个岩体出露面积一般小于0.12 km<sup>2</sup>,最大0.17 km<sup>2</sup>,长度数百m,断层的交汇部位是岩浆侵入体主要区域(图1b)。区内已发

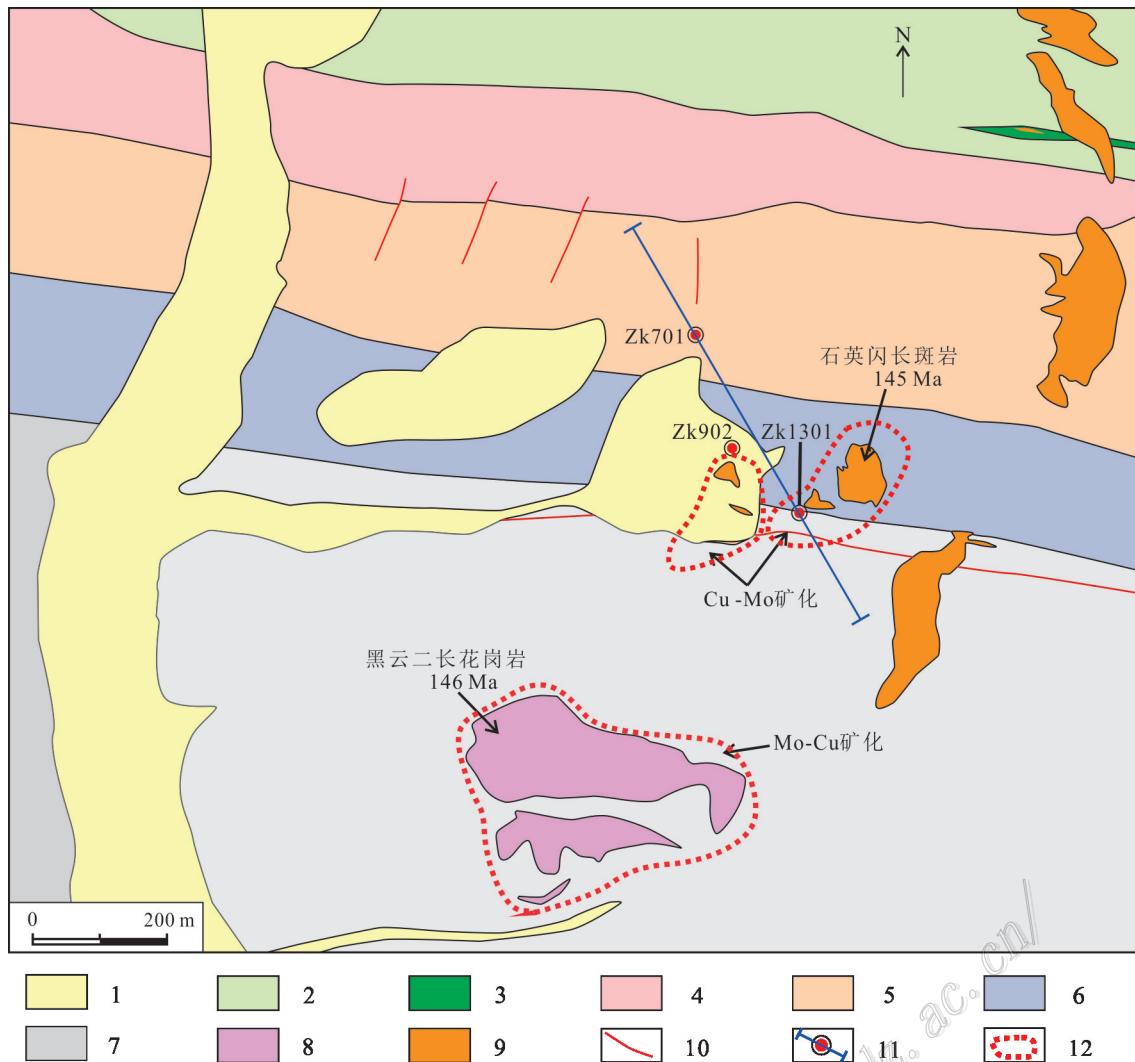


图2 池沟Cu-Mo矿床地质简图(据谢桂青等,2012;任涛等,2014修改)

1—第四系;2—大理岩;3—石榴子石-辉石矽卡岩;4—石英黑云母角岩、粉砂岩互层;5—透辉石角岩;6—石英黑云母角岩;7—石英砂岩、黑云母角岩互层;8—黑云二长花岗岩(146 Ma);9—石英闪长斑岩(145 Ma);10—断层;11—勘探线、钻孔位置;12—矿化范围

Fig. 2 Geological map of the Chigou Cu-Mo deposit (modified from Xie et al., 2012; Ren et al., 2014)

1—Quaternary; 2—Marble; 3—Garnet-pyroxene skarn; 4—Quartz biotite hornfels and siltstone interbeds; 5—Diopside hornfel; 6—Quartz-biotite hornfels; 7—Quartz sandstone and biotite hornfels interbed; 8—Biotite monzonitic granite(146 Ma); 9—Quartz diorite porphyry (145 Ma); 10—Faults; 11—Exploration lines and drill hole locations; 12—Mineralized area

现多个中小规模斑岩-矽卡岩型铜(钼)矿床,含矿岩体多为花岗闪长斑岩和石英闪长斑岩,这些矿床具有明显的空间分带特征,在岩体与地层的接触带常见角岩化、绿帘石化、绿泥石化、绢云母化及硅化等热液蚀变(谢桂青等,2012;吴发富等,2014;Chen et al., 2022)。

## 2 矿床地质

池沟铜钼矿床位于柞水-山阳矿集区中部(图1a),是该矿集区内最大的铜矿床。其地层主要为中

泥盆世池沟组,自北向南依次发育石英质黑云母角岩、透辉石角岩、石英黑云母角岩和石英砂岩、黑云母角岩互层(图2)。矿区发育着近EW向的大断裂和一些NE向的次级断裂,这些断裂控制侵入体的分布和成矿作用。根据地勘资料,本文编绘了1条NW向剖面(ZK1301-ZK902-ZK701)来展示岩体和矿体的分布(图3)。

除了矿区南部地表的黑云二长花岗岩,钻孔发育石英闪长斑岩(QDP)和细粒花岗岩(FG),表现为不同规模的岩脉和透镜体(图3)。石英闪长斑岩呈

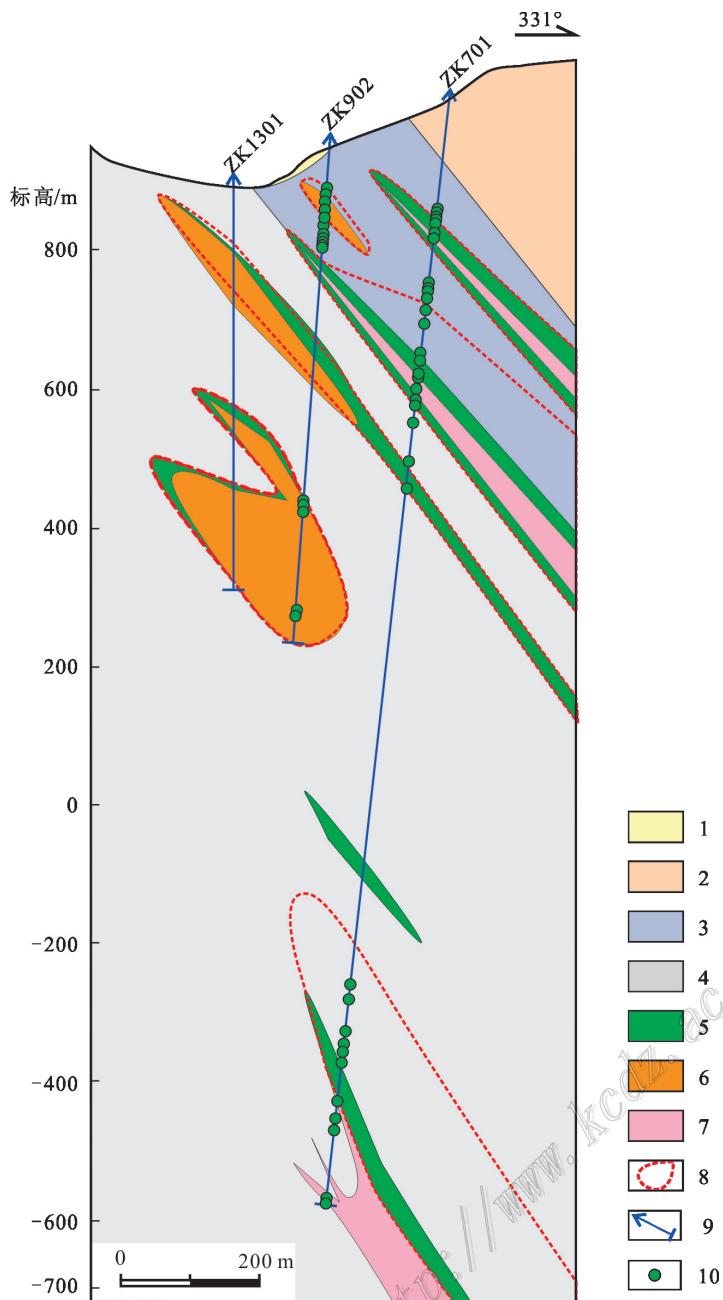


图3 池沟Cu-Mo矿床ZK1301-ZK902-ZK701地质剖面图

1—第四系;2—透辉石角岩;3—石英黑云母角岩;4—石英砂岩、黑云母角岩互层;5—石榴子石-辉石矽卡岩;6—石英闪长斑岩(145 Ma);  
7—细粒花岗岩;8—铜矿体(>0.2%);9—钻孔;10—采样点

Fig. 3 Geological section plan of ZK1301-ZK902-ZK701 in the Chigou Cu-Mo deposit

1—Quaternary; 2—Diopsidic hornfels; 3—Quartz-biotite hornfels; 4—Quartz sandstone and biotite interbeds; 5—Garnet pyroxene skarn;  
6—Quartz diorite porphyry (145 Ma); 7—Fine-grained granite; 8—Copper orebody (>0.2%); 9—Drill hole; 10—Sampling point

斑状结构, 斑晶由斜长石(20%)、黑云母(10%)组成, 基质由石英(10%)、斜长石(40%)、黑云母(5%)和角闪石(15%)组成(图4a~c)。石英闪长斑岩中发育黑云母角岩的包体(图4a,b)。细粒花岗岩主要呈岩脉发育, 由石英(40%)、斜长石(60%)、黑云母(10%)组

成(图4d,e), 部分长石被次生石英交代。

岩体经历了强烈的石英-绢云母化蚀变, 石英闪长斑岩中的斜长石和黑云母斑晶受到强烈的绢云母化蚀变(图4c); 细粒花岗岩中的斜长石被次生石英所交代(图4e)。围岩地层普遍发育石榴子石+辉石+

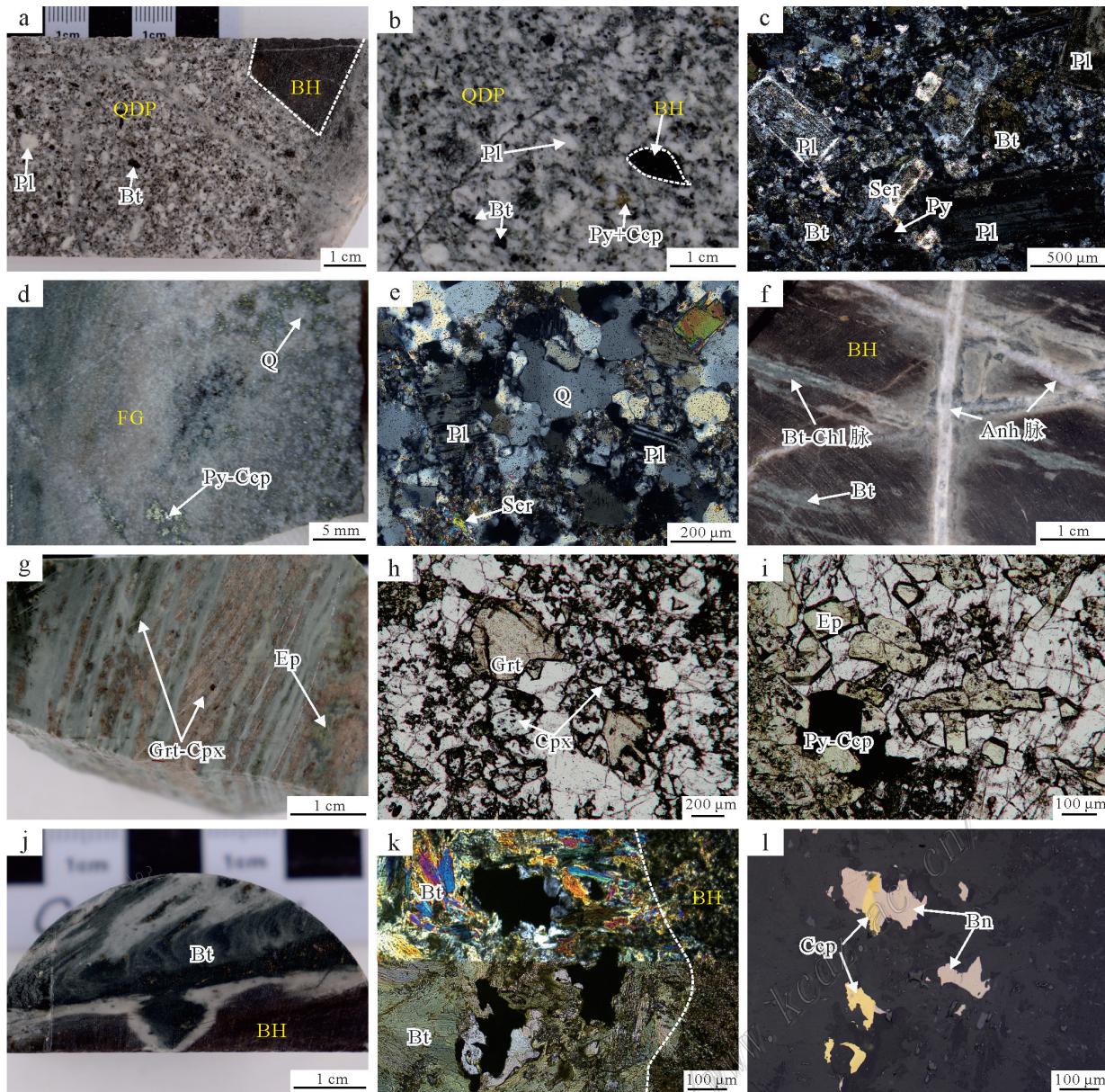


图4 池沟Cu-Mo矿床典型岩石手标本和镜下照片

a~c. 石英闪长斑岩的手标本和镜下照片,发育黑云母角岩(地层)包体;d、e. 细粒花岗岩的手标本和镜下照片,部分斜长石被石英-绢云母化蚀变所掩盖,发育浸染状的Fe-Cu硫化物;f. 部分黑云母-绿泥石脉切穿黑云母角岩,后期的硬石膏脉切穿黑云母-绿泥石脉;g. 层状的石榴子石、辉石和绿帘石与热液黑云母呈互层发育;h. 石榴子石和辉石呈粒状共生;i. 绿帘石成粒状和短柱状,并与少量黄铁矿、黄铜矿共生;j. 热液黑云母交代黑云母角岩并形成少量浸染状矿化;k、l. 热液黑云母与金属硫化物(黄铜矿-斑铜矿)的共生组合,k为单偏光和正交偏光,l为反射光

Anh—硬石膏; BH—黑云母角岩; Bn—斑铜矿; Bt—黑云母; Ccp—黄铜矿; Chl—绿泥石; Cpx—辉石; Ep—绿帘石; Grt—石榴子石; FG—细粒花岗岩; Pl—斜长石; Py—黄铁矿; Q—石英; QDP—石英闪长斑岩; Ser—绢云母

Fig. 4 Typical hand specimens and microscopic photos of the Chigou Cu-Mo deposit

a~c. Hand specimens and microscopic photos of quartz diorite porphyry, with biotite hornfels (strata) inclusions; d, e. Hand specimens and microscopic photos of fine-grained granite, with some plagioclase obscured by quartz-sericite alteration, and developed disseminated Fe-Cu sulfides; f. Part of biotite-chlorite veins cut through biotite hornfels, and later anhydrite veins cut through biotite-chlorite veins; g. Layered andradite, pyroxene and epidote interbedded with hydrothermal biotite; h. Andradite and pyroxene formed granular symbiosis; i. Epidote formed granular and short columnar, and coexisted with a small amount of pyrite and chalcopyrite; j. Hydrothermal biotite altered biotite hornfels and formed a small amount of disseminated mineralization; k, l. Hydrothermal biotite and metal sulfides (chalcopyrite-bornite) symbiotic combination, k is plane polarized light and crossed polarized light, l is reflected light

Anh—Anhydrite; BH—Biotite hornfels; Bn—Bornite; Bt—Biotite; Ccp—Chalcopyrite; Chl—Chlorite; Cpx—Clinopyroxene; Ep—Epidote; Grt—Garnet; FG—Fine-grained granite; Pl—Plagioclase; Py—Pyrite; Q—Quartz; QDP—Quartz diorite porphyry; Ser—Sericite

绿帘石+黑云母+绿泥石蚀变组合(图 4f~i)。黑云母角岩在热液蚀变中形成了次生黑云母和绿泥石,呈脉状和透镜状,并被晚阶段的硬石膏脉穿切(图 4f)。石榴子石、辉石和绿帘石与热液黑云母呈条带状发育(图 4g、h)。铜矿化在空间上发育在石英闪长斑岩和细粒花岗岩脉内外接触带(图 3),其中 ZK701 展示了矿区细粒花岗岩脉与 Cu 矿化关系。在石英闪长斑岩和细粒花岗岩中均有发育铜矿化,主要与石英-绢云母化蚀变有关(图 4b~e),赋矿地层中的铜矿化与绿帘石、黑云母等含水矿物共生(图 4i~k)。金属硫化物呈团块状和浸染状,Cu 的主要载体为黄铜矿,并有少量的斑铜矿共生(图 4l)。

### 3 分析方法

从 ZK701 岩芯中收集了细粒花岗岩脉接触带中含有石榴子石和辉石的代表性样品,并制备成光薄片。矿物的主量元素定量分析在中国地质大学(武汉)完成,仪器型号为 JXA-8230。分析条件包括 15 kV 加速电压、20 mA 光束电流和  $\sim 1 \mu\text{m}$  光束尺寸。主量元素含量的校正标样使用由 SPI 公司提供的 53 种矿物标样、44 种单质标样及 15 种稀土元素标样,数据校正方法采用日本电子(JEOL)的 ZAF 校正方法进行修正。

从 ZK701 岩芯中采集了 2 个细粒花岗岩样品,其中分别为 701-Y1(标高:573 m) 和 701-YB155(标高:-558 m)。样品 701-Y1 使用传统的重液和磁选技术分离锆石颗粒。将代表性颗粒放在显微镜下的环氧树脂圆盘上,然后对其进行抛光。样品 701-YB155 直接选取激光薄片中共生的锆石颗粒。利用透射、反射光显微镜和扫描电子显微镜的阴极发光(SEM-CL)对锆石的形貌和内部结构进行了研究。锆石 U-Pb 定年及微量元素分析在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与矿产评价重点实验室进行。使用的仪器是 Finnigan Neptune 多收集器(MC)-ICP-MS 和 NewWave UP213 激光烧蚀系统。氦气被用作烧蚀气溶胶的载气。分析以 30  $\mu\text{m}$  光斑尺寸、锆石 91500、GJ-1 和 Plešovice 为参比标准,NIST610 为外标。每 6 个样品之间测量 2 个标准锆石 GJ-1。单个数据的误差为  $1\sigma$ 。加权平均年龄置信度在 95% 以上,测年精度为  $\sim 1\%$  ( $2\sigma$ )。使用 ICP-MS DataCal 软件进行数据处理(Liu et al., 2008)。

## 4 分析结果

### 4.1 矿物组成

细粒花岗岩脉接触带的石榴子石和辉石的主量元素成分列于表 1 和表 2。

石榴子石除了 1 个测试点具有较高的  $w(\text{Al})$  ( $\text{And}_{68}\text{Gro}_{25}$ ),其余均具有较高的  $w(\text{Fe})$  ( $\text{And}_{86-94}\text{Gro}_{0-8}$ ),显示出钙铁榴石的特征。辉石整体表现为富 Mg 的透辉石( $\text{Di}_{60-72}\text{Hd}_{26-38}$ )。矿物颗粒成分较为均一。

### 4.2 锆石 U-Pb 年龄和微量元素组成

样品 701-Y1 和 701-YB155 的锆石镜下特征及阴极发光特征见图 5,U-Pb 年龄和微量元素结果汇总于表 3 和表 4。

ZK701-Y1 样品中的锆石多呈半自型粒状,颗粒大多破裂,粒径为 50~80  $\mu\text{m}$ ,具有明显的震荡环带(图 5)。测试结果显示,锆石中的  $w(\text{U})$  为  $(76\sim 931)\times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})$  为  $(105\sim 598)\times 10^{-6}$ ,  $\text{Th}/\text{U}$  值为 0.44~1.64。锆石中混入了大量的继承锆石,U-Pb 年龄范围为 141~2043 Ma(图 6a、b)。计算的概率累积曲线存在 3 个区间分别为:161~141 Ma,峰值为 150 Ma;463~427 Ma,峰值为 446 Ma;852~737 Ma,峰值为 794 Ma(图 6b)。其余零散分布着一些古老锆石,最老年达到 2043 Ma(图 5, #29)。锆石的  $w(\text{Ti})$  在  $(1.46\sim 11.31)\times 10^{-6}$  之间,使用钛锆石温度计(Ferry et al., 2007)计算出锆石的结晶温度在 686~871°C 之间。

ZK701-YB155 样品中的锆石多与石英、斜长石共生,呈半自型粒状,颗粒较为完整,粒径为 50~150  $\mu\text{m}$ ,具有明显的震荡环带(图 5)。测试结果显示,锆石中的  $w(\text{U})$  为  $(118\sim 719)\times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})$  为  $(72\sim 407)\times 10^{-6}$ ,  $\text{Th}/\text{U}$  值为 0.53~0.99。锆石中混入了大量的继承锆石,U-Pb 年龄范围为 446~1726 Ma(图 6c)。计算的概率累积曲线存在 2 个区间分别为:447~465 Ma,峰值为 450 Ma;732~806 Ma,峰值为 772 Ma(图 6d)。其余零散分布着一些古老锆石,最老年达到 1726 Ma(表 3)。锆石的  $w(\text{Ti})$  为  $(3.76\sim 36.44)\times 10^{-6}$ ,使用 Ti 锆石温度计计算出锆石的结晶温度在 762~1012°C 之间。

## 5 讨 论

### 5.1 细粒花岗岩脉的形成时代

对锆石进行系统的内部结构、微量元素特征等

表 1 池沟 Cu-Mo 矿床石榴子石成分分析结果

Table 1 Composition analysis results of garnet from the Chigou Cu-Mo deposit

组分	701-6-1	701-6-2	701-6-3	701-6-4	701-6-5	701-9-1	701-9-3	701-9-4	701-9-5
<i>w(B)/%</i>									
Na <sub>2</sub> O	0.02	0	0	0	0	0	0	0.01	0
SiO <sub>2</sub>	37.37	37.37	37.21	37.37	37.62	37.53	37.30	37.30	38.37
MgO	0.03	0.04	0.03	0.01	0.01	0.02	0.05	0.05	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0	0	0.02	1.30	1.51	0.50	0.82	5.10
K <sub>2</sub> O	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0
CaO	32.58	32.63	32.71	32.62	32.97	32.90	32.67	32.70	33.24
FeO	28.35	28.55	28.44	28.49	26.97	26.20	27.79	27.46	22.27
MnO	0.28	0.30	0.21	0.26	0.25	0.27	0.23	0.21	0.29
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0.03	0
TiO <sub>2</sub>	0	0	0.05	0	0	0.03	0.02	0	0.05
总和	98.65	98.89	98.65	98.78	99.13	98.46	98.57	98.58	99.33
以 12 个氧原子为基准计算的阳离子数									
Si	3.10	3.10	3.09	3.10	3.09	3.10	3.09	3.09	3.10
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0.13	0.15	0.05	0.08	0.49
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe <sup>3+</sup>	1.79	1.81	1.81	1.80	1.69	1.64	1.76	1.74	1.30
Fe <sup>2+</sup>	0.18	0.17	0.16	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.21
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
Mg	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0.01	0
Ca	2.90	2.90	2.91	2.90	2.91	2.92	2.90	2.90	2.88
Gro	0.11	0	0	0.08	6.53	7.70	2.53	4.15	25.23
And	93.28	93.57	94.11	93.41	87.37	86.19	91.27	89.66	67.51
Pyr	6.61	6.43	5.89	6.49	6.10	6.11	6.18	6.08	7.27

注: And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石; Spr—铝榴石(镁铝榴石+锰铝榴石+钙铬榴石); “0”表示低于检测限。

表 2 池沟 Cu-Mo 矿床辉石成分(*w(B)/‰*)分析结果Table 2 Composition analysis results (*w(B)/‰*) of pyroxene from the Chigou Cu-Mo deposit

组分	701-6-1	701-6-2	701-6-3	701-6-4	组分	701-6-1	701-6-2	701-6-3	701-6-4
SiO <sub>2</sub>	53.01	52.97	52.59	52.32	Ti	0	0	0	0
TiO <sub>2</sub>	0	0.02	0	0	Al	0.02	0.01	0.01	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.38	0.29	0.31	0.28	Cr	0	0	0	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0.01	0	Fe <sup>3+</sup>	0.02	0.04	0.03	0.03
FeO	8.75	9.59	11.27	12.94	Fe <sup>2+</sup>	0.26	0.26	0.33	0.38
MnO	0.58	0.59	0.62	0.56	Mn	0.02	0.02	0.02	0.02
MgO	12.79	12.69	11.37	10.51	Mg	0.71	0.71	0.64	0.59
CaO	24.38	24.43	24.09	24.07	Ca	0.98	0.98	0.97	0.98
Na <sub>2</sub> O	0.11	0.11	0.17	0.12	Na	0.01	0.01	0.01	0.01
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0	0	K	0	0	0	0
总和	100.01	100.7	100.43	100.8	Jo	1.85	1.90	2.00	1.82
以 6 个氧原子为基准计算的阳离子数									
Si	1.99	1.98	1.98	1.98	Di	72.15	71.75	64.83	60.09
					Hd	26.01	26.35	33.17	38.09

注: Di—透辉石; Hd—钙铁辉石; Jo—钙锰辉石; “0”表示低于检测限。

表 3 池沟 Cu-Mo 矿床细粒花岗岩锆石 U-Pb 分析结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis results of fine-grained granite from the Chigou Cu-Mo deposit

样号	点号	$w(B)/10^{-6}$			同位素比值				年龄/Ma	
		Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$	Age	$\pm\sigma$
	701-Y1-1	47.59	280.37	409.58	0.70391	0.02006	0.09237	0.00206	569.5	12.2
	701-Y1-2	21.73	183.81	231.51	0.53936	0.01196	0.06976	0.00099	434.7	6.0
	701-Y1-3	32.03	34.69	137.66	2.08833	0.04210	0.19246	0.00268	1,134.7	14.5
	701-Y1-4	3.31	75.96	105.13	0.19615	0.03236	0.02451	0.00153	156.0	9.6
	701-Y1-5	117.35	629.13	1,210.32	0.68268	0.03013	0.08240	0.00287	510.5	17.1
	701-Y1-6	5.09	100.82	160.14	0.17903	0.02697	0.02534	0.00152	161.3	9.6
	701-Y1-8	46.81	238.39	504.74	0.58051	0.01100	0.07354	0.00093	457.4	5.6
	701-Y1-9	44.05	164.99	569.20	0.53783	0.01279	0.05951	0.00123	372.7	7.5
	701-Y1-11	56.86	238.37	311.43	1.26210	0.02561	0.13147	0.00178	796.3	10.1
	701-Y1-12	16.44	109.16	163.11	0.58339	0.01838	0.07452	0.00114	463.3	6.8
	701-Y1-13	60.76	237.76	310.41	1.30269	0.02593	0.14126	0.00202	851.8	11.4
	701-Y1-14	51.66	598.55	519.81	0.55444	0.01300	0.07149	0.00119	445.1	7.2
	701-Y1-16	73.91	409.26	817.77	0.55216	0.00885	0.06853	0.00069	427.3	4.2
ZK701-Y1	701-Y1-17	4.45	97.76	157.05	0.16284	0.02246	0.02324	0.00089	148.1	5.6
	701-Y1-18	53.60	353.67	290.14	1.10412	0.02358	0.12110	0.00156	736.9	9.0
	701-Y1-19	65.67	250.06	389.34	1.12946	0.02154	0.12429	0.00161	755.2	9.2
	701-Y1-20	5.23	151.15	180.14	0.15153	0.02222	0.02245	0.00112	143.1	7.0
	701-Y1-21	28.40	261.37	270.12	0.58022	0.01454	0.07346	0.00095	457.0	5.7
	701-Y1-22	5.01	115.16	176.34	0.16697	0.01621	0.02207	0.00109	140.7	6.9
	701-Y1-23	86.90	407.51	931.49	0.57000	0.00939	0.07421	0.00095	461.5	5.7
	701-Y1-24	37.16	222.56	405.20	0.54661	0.01051	0.06998	0.00089	436.0	5.4
	701-Y1-25	64.23	482.91	722.30	0.57601	0.01670	0.06724	0.00071	419.5	4.3
	701-Y1-26	75.43	98.58	406.72	1.52787	0.03147	0.14987	0.00234	900.2	13.1
	701-Y1-27	113.39	86.72	384.87	2.99291	0.06474	0.24810	0.00472	1,428.7	24.4
	701-Y1-28	124.88	892.88	1,524.52	0.50767	0.00885	0.06097	0.00055	381.5	3.4
	701-Y1-29	102.13	133.89	193.64	6.71150	0.09887	0.37284	0.00454	2,042.7	21.3
	701-Y1-30	19.92	231.59	187.79	0.55231	0.01537	0.06953	0.00082	433.3	4.9
	701-YB155-1	93.37	313.91	640.61	1.04804	0.01830	0.12033	0.00165	732.5	9.5
	701-YB155-2	48.34	195.30	297.29	1.13616	0.02190	0.12925	0.00158	783.6	9.0
	701-YB155-3	28.71	194.64	325.06	0.55054	0.01370	0.07176	0.00098	446.7	5.9
	701-YB155-4	45.56	98.46	251.71	1.46139	0.02662	0.15405	0.00221	923.6	12.3
	701-YB155-5	242.10	1,906.07	2,772.01	0.60377	0.01523	0.07223	0.00164	449.6	9.9
	701-YB155-6	40.29	407.43	410.66	0.53589	0.01016	0.07238	0.00092	450.5	5.5
	701-YB155-7	74.61	154.83	392.79	1.55681	0.02600	0.16069	0.00184	960.6	10.2
	701-YB155-8	214.56	568.55	836.69	2.09592	0.02967	0.19867	0.00219	1,168.2	11.8
	701-YB155-9	68.92	363.36	721.40	0.64949	0.01716	0.08098	0.00119	502.0	7.1
ZK701-YB155	701-YB155-10	72.35	173.59	208.85	3.36053	0.06870	0.25965	0.00295	1,488.1	15.1
	701-YB155-11	62.68	380.60	719.06	0.54393	0.00934	0.07233	0.00092	450.2	5.5
	701-YB155-12	10.57	71.90	118.10	0.56005	0.01677	0.07193	0.00077	447.8	4.7
	701-YB155-13	38.86	219.02	212.10	1.20982	0.02437	0.13320	0.00148	806.1	8.4
	701-YB155-14	75.10	211.64	506.75	1.18519	0.01953	0.12412	0.00169	754.2	9.7
	701-YB155-15	53.31	92.35	397.02	1.15022	0.03943	0.12377	0.00332	752.2	19.1
	701-YB155-16	47.75	85.33	118.30	4.55247	0.07881	0.30704	0.00362	1,726.1	17.9
	701-YB155-17	31.39	201.00	359.04	0.54267	0.01110	0.07206	0.00094	448.6	5.7
	701-YB155-18	19.52	160.95	204.74	0.53544	0.01373	0.07480	0.00106	465.0	6.4
	701-YB155-19	20.52	179.77	213.29	0.55018	0.01123	0.07204	0.00103	448.4	6.2

表4 池沟Cu-Mo矿床细粒花岗岩锆石微量元素 $w(B)/10^{-6}$ 分析结果Table 4 Trace element analysis results  $w(B)/10^{-6}$  of zircon from fine-grained granite of the Chigou Cu-Mo deposit

样品名称	点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
701-Y1	701-Y1-4	0	13.00	0	0.80	1.85	0.68	7.31	2.60	30.94	12.18	65.04	15.64
	701-Y1-6	0	16.39	0.11	1.02	0.84	0.56	6.68	2.33	29.69	10.88	63.12	14.03
	701-Y1-17	0	19.57	0.12	1.23	2.84	1.24	13.81	4.55	59.80	24.41	130.23	29.10
	701-Y1-20	0	18.34	0.12	0.57	1.69	0.56	8.81	2.88	38.04	14.87	78.93	17.71
	701-Y1-22	0	15.84	0	0	1.50	0.71	6.64	2.67	35.28	13.78	69.90	15.95
样品名称	点号	Yb	Lu	$\Sigma$ REE	U	Th	Th/U	Ti	Eu/Eu*	T/°C	Log( $f(O_2)$ )	$\Delta$ FMQ	
701-Y1	701-Y1-4	147.48	33.42	330.94	75.96	105.13	1.38	7.99	0.56	834.37	-13.14	0.89	
	701-Y1-6	139.53	33.23	318.42	101.60	165.17	1.63	6.99	0.72	821.03	-13.28	1.02	
	701-Y1-17	293.86	67.16	647.91	98.45	161.51	1.64	10.50	0.60	862.63	-12.48	0.99	
	701-Y1-20	176.99	42.26	401.75	152.26	185.50	1.22	9.61	0.44	853.38	-12.81	0.84	
	701-Y1-22	162.49	38.67	363.43	115.97	181.41	1.56	5.72	0.68	801.64	-13.66	1.05	

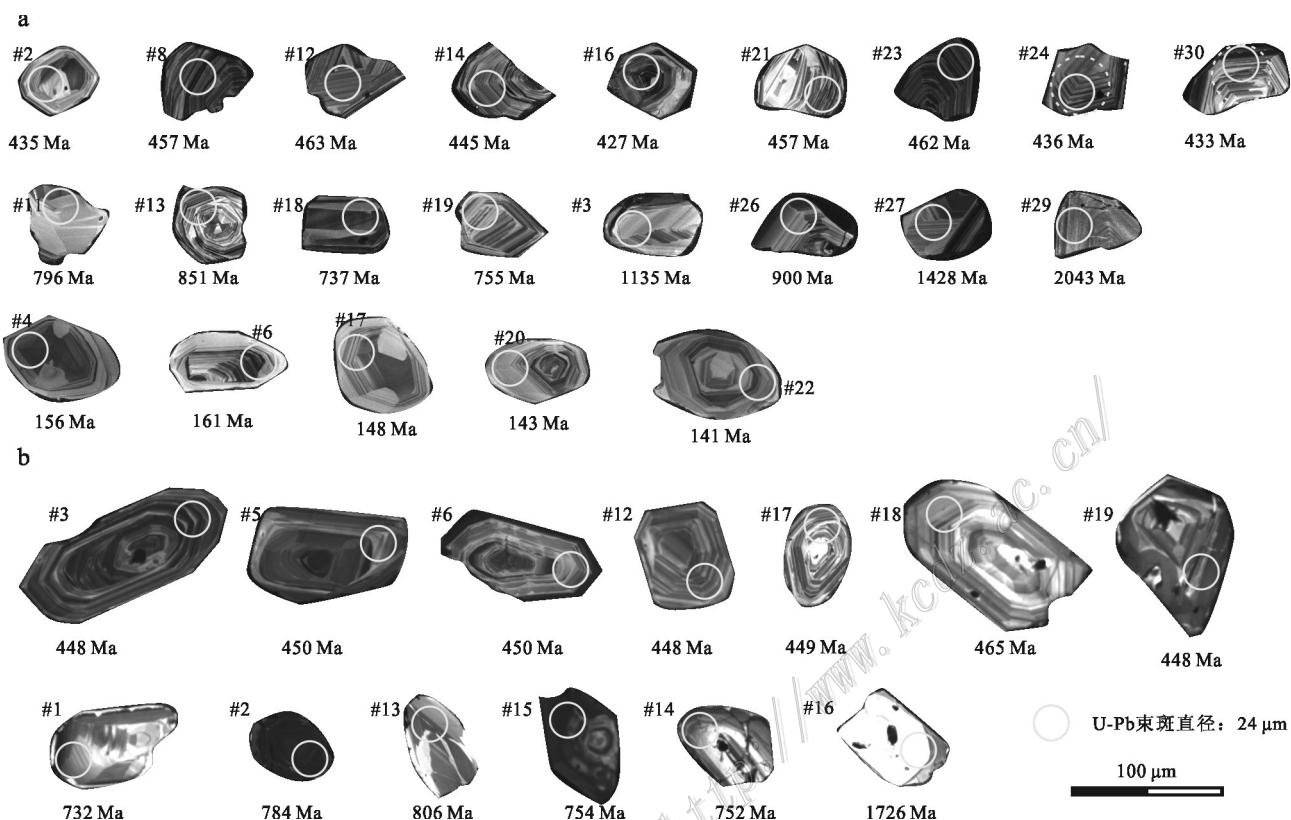


图5 池沟Cu-Mo矿床701-Y1(a)和701-YB155(b)花岗岩中锆石的阴极发光特征(“#”为测点的序号,颗粒下部数字为单个锆石U-Pb年龄)

Fig. 5 Cathodoluminescence characteristics of zircons in granite 701-Y1 (a) and 701-YB155 (b) from the Chigou Cu-Mo deposit (“#” is the serial number of the measurement point, and the numbers below the particles are the U-Pb age of each zircon)

综合研究,区分不同锆石的成因机制,对剖析岩石成因具有重要意义(吴元保等,2004)。通常岩浆锆石呈半自形-自形结构,具有典型的岩浆震荡环带(Hoskin et al., 2003);而变质锆石具有复杂的内部结构,多数为他形-自形,环带结构不发育,其成因可能为变质过程中新生长的锆石或对原有锆石不同程度

的改造(吴元保等,2004)。细粒花岗岩脉中的锆石表现出复杂的成因类型,根据锆石在岩体中的赋存状态、自形程度、CL内部结构、U-Pb年龄和微量元素特征,可大致划分为3组:晚中生代锆石、早古生代锆石和新元古代锆石(图6a~d)。

晚中生代锆石仅在浅部岩脉(701-Y1)中少量识

别,锆石呈自形-半自形特征,表现出明显的震荡环带。锆石Th/U值为1.22~1.64,为典型的岩浆锆石(图6a;Konzett et al.,1998)。通过计算晚中生代锆石,得到了( $146\pm5.7$ )Ma的等时线年龄(图6a)。早古生代锆石呈自形-半自形特征,表现出明显的震荡环带,深部岩脉(701-YB155)相较于浅部(701-Y1)的锆石粒径明显更大。根据锆石阴极发光和Th/U值(0.44~1.23),类似于岩浆锆石(Th/U>0.4)。通过计算早古生代锆石得到了( $449.4\pm4.0$ )Ma的等时线年龄(图6c)。新元古代锆石呈复杂的内部结构,多数发育明显的震荡环带,其Th/U值为0.64~1.22,为典型的岩浆锆石,其年龄峰值集中在772 Ma和794 Ma(图6b,d)。

根据以下证据,笔者认为( $146\pm5.7$ )Ma可以作

为细粒花岗岩的成岩年龄(图6a):①在岩脉中识别出多个晚中生代岩浆锆石,且锆石颗粒环带明显,未受到强烈的蚀变作用(图5a,b),其U-Pb年龄可以代表锆石的形成年龄;②细粒花岗岩呈脉状侵入中泥盆世池沟组中(图3),表明其形成年龄晚于中泥盆世,排除了早古生代和新元古代成岩的可能性。早古生代和新元古代锆石的年龄比岩体的形成年龄要老得多,说明它们不是在岩浆形成的过程中结晶出来,而是在岩浆运移和侵入的过程中从围岩中捕获或继承过来的。一般来说,捕获或继承锆石的成因可能有2种:①碎屑成因锆石从浅表的沉积岩中被岩浆捕获的;②岩浆和变质成因锆石从深部的火成片麻岩中被岩浆捕获的(Zheng et al.,2006;Wang et al.,2020;徐大良等,2023)。细粒花岗岩中的早古生

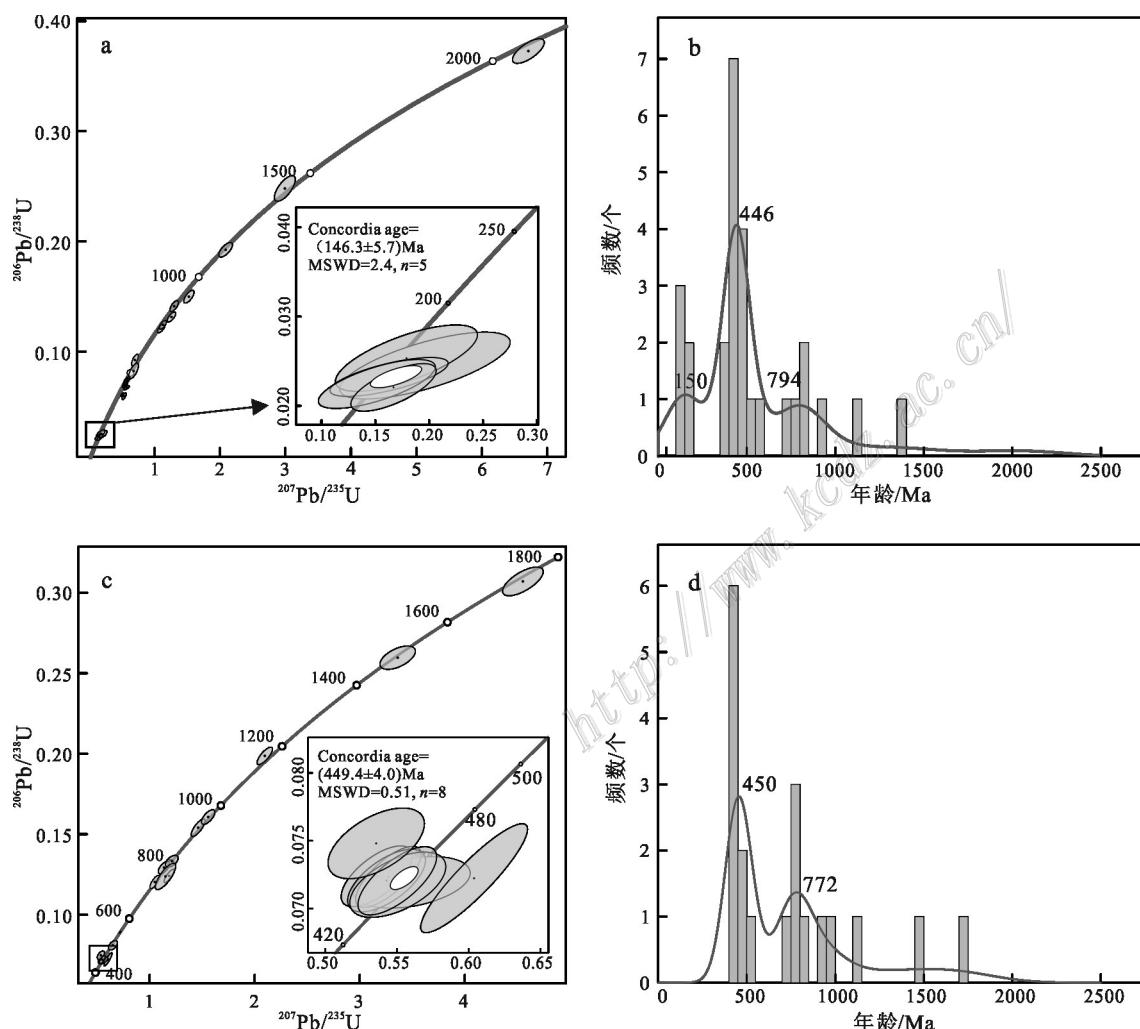


图6 池沟Cu-Mo矿床细粒花岗岩中锆石的U-Pb年龄图(a、c)和年龄概率积累曲线直方图(b、d)  
Fig. 6 Zircon U-Pb age plots (a, c) and age probability cumulative curve histograms (b, d) of fine-grain granite  
in the Chigou Cu-Mo deposit

代捕获锆石，在柞水-山阳矿集区没有岩浆记录，但其形成年代与东秦岭地区的早古生代岩浆活动一致，对应了古特提斯洋闭合与二郎坪弧后盆地伸展的背景(Wang et al., 2015)。细粒花岗岩中的新元古代(772 Ma 和 794 Ma, 图6)捕获锆石可能来自于深部的新元古代岩浆火成岩，得到以下证据支持：① 锆石的震荡环带和高 Th/U 值揭示了新元古代继承锆石的岩浆成因(吴元保等, 2004)；② 柞水-山阳矿集区发育新元古代闪长岩+钠长岩+花岗岩组合(Xie et al., 2017)，并且在南秦岭区域内存在持续的新元古代岩浆事件(850~700 Ma, Zhang et al., 2023)，暗示其深部同时代岩浆活动。一些学者认为新元古代岩浆经历了早期微陆块间的俯冲增生造山和晚期的裂解过程，与 Rodinia 大陆的裂解有关(Chen et al., 2006; 徐大良等, 2023)。而深部岩脉(701-YB155)未识别到晚中生代岩浆锆石，可能由于细粒花岗岩捕获了大量的早古生代和新元古代锆石，并且同期岩浆锆石结晶较少(图5)，这对识别晚中生代锆石造成了干扰。

## 5.2 细粒花岗岩性质及成矿潜力

矿区存在石英闪长斑岩和细粒花岗岩2个世代岩浆活动，石英闪长斑岩和相伴生铜矿形成于晚中生代得到早期的研究证实(谢桂青等, 2012; 吴发富等, 2014)。地球化学指示石英闪长斑岩具有富集K、Rb、Sr 和 Ba 等大离子亲石元素、亏损Nb、Ta、Ti、P 和 Hf 等高场强元素的特征，具有形成铜矿的潜力(谢桂青等, 2012)。细粒花岗岩的成岩年龄为 146 Ma，与石英闪长斑岩的形成年龄基本一致，可能是同期不同阶段的岩浆，均与前人报道的成矿年龄一致(任涛等, 2014)。以往的成矿集中在矿区的南部，而新发现的细粒花岗岩脉产出在矿区的北部，并伴随着厚层的铜矿体，暗示了北区晚中生代细粒花岗斑岩脉具有成铜潜力。

高氧逸度和高含水量是形成斑岩-矽卡岩铜矿的重要条件。研究表明，世界范围内的俯冲环境下和碰撞环境下形成的斑岩-矽卡岩铜矿都具有较高的氧逸度，通常  $\Delta\text{FMQ} > 1.0$  的岩浆运输 Cu 元素的潜力较大(Wang et al., 2014; 孙卫东, 2020; 杨航等, 2023)。在高氧逸度条件下，S 主要溶解在硅酸盐熔体中，以  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{SO}_2$  的形式赋存在岩浆中，提高了 Cu 在岩浆中的溶解度(Sun et al., 2015; Richards, 2021)。流体包裹体和同位素研究表明，成矿流体以  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$  体系为主(Zhang et al., 2020)，暗示流体的高氧逸度特征。进矽卡岩矿物以具有氧化条件下的钙铁榴石+透辉石组合(Meinert et al., 2005)。

通过对池沟矽卡岩矿物的成分分析，细粒花岗岩接触带的石榴子石和辉石位于典型的矽卡岩铜矿区域，暗示其形成于氧化环境(图7)。

锆石的微量元素组成广泛用于定量计算岩浆氧逸度(Waters et al., 2015; Wang et al., 2021)。利用锆石的Ce、U、Ti的含量可定量计算岩浆的氧化还原状态(Loucks et al., 2020)，笔者计算得到上段细粒花岗岩脉的  $\log f(\text{O}_2)$  范围在 -13.7~ -12.5，计算得  $\Delta\text{FMQ} = 0.8 \sim 1.0$ (表4)。用相同的方法对石英闪长斑岩中锆石计算氧逸度，结果显示细粒花岗岩与石英闪长斑岩具有相似的锆石结晶温度和  $\log f(\text{O}_2)$  值，表现出相似的氧逸度(图8a)。锆石的  $\text{Eu}_{\text{N}}/\text{Eu}_{\text{N}}^*$  通常可以作为高含水量的标志，并与氧逸度成正比(Ge et al., 2023)。统计表明，东秦岭造山带与斑岩-矽卡岩铜矿化相关的岩浆锆石的  $\text{Eu}_{\text{N}}/\text{Eu}_{\text{N}}^*$  普遍大于 0.4 (Li et al., 2024)。池沟细粒花岗岩的  $\text{Eu}_{\text{N}}/\text{Eu}_{\text{N}}^*$  大于 0.4，与石英闪长斑岩具有相似的含水量(图8b)。综上所述，细粒花岗岩在时空分布上与铜成矿具有成因联系，并且具有高氧逸度和含水量特征，具有形成 Cu 矿的潜力。

## 5.3 地质意义

池沟铜钼矿床中与黄铜矿共生的辉钼矿的 Re-

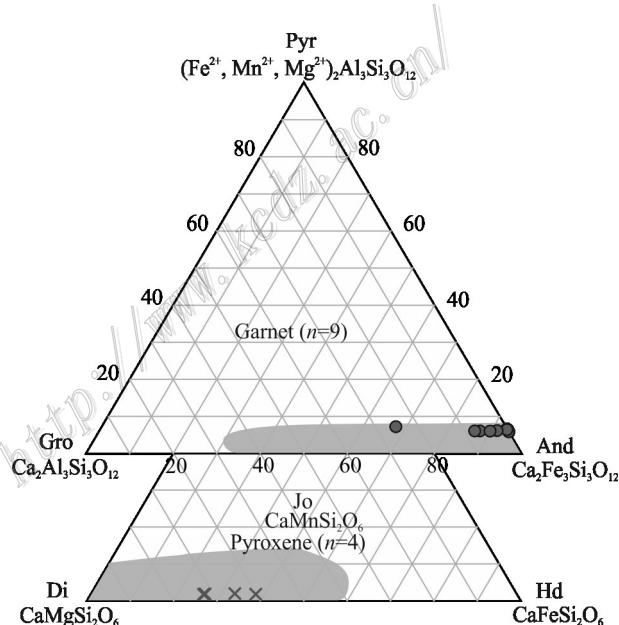


图 7 池沟 Cu-Mo 矿床石榴子石和辉石的成分分布图  
And—钙铁榴石；Di—透辉石，Gro—钙铝榴石，Hd—钙铁辉石，  
Jo—钙锰辉石；Pyr—铅榴石包括(镁铝榴石+铁铝榴石+锰铝榴石)

Fig. 7 Composition distribution of garnet and pyroxene in the Chigou Cu-Mo deposit  
And—Andradite; Di—Diopside; Gro—Grossularite; Hd—Hedenbergite;  
Jo—Johannsenite; Pyr—Pyralspite(pyrope+almandine+spessartine)

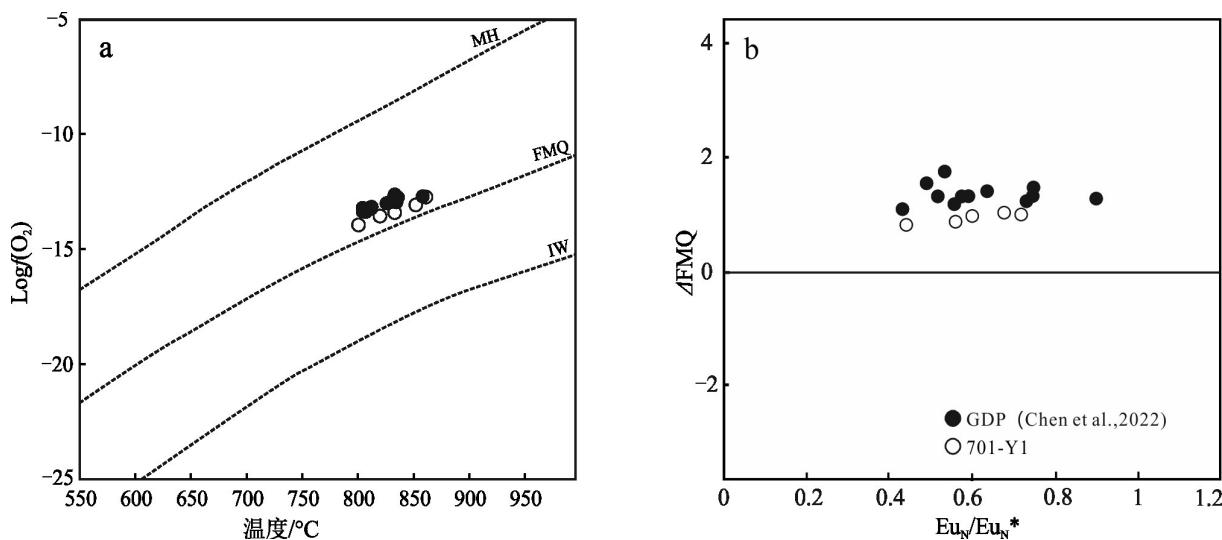


图8 池沟铜钼矿床花岗质岩脉中锆石的微量元素特征

a. 温度和 $\log f(O_2)$ 的关系; b. 锆石 $Eu_N/Eu_{N^*}$ 和 $\Delta FMQ$ 的关系(石英闪长斑岩数据据Chen et al., 2022)

Fig. 8 Trace element characteristics of zircons in granitoid dikes from the Chigou Cu-Mo deposit

a. Temperature versus  $\log f(O_2)$ ; b. Zircon  $Eu_N/Eu_{N^*}$  versus  $\Delta FMQ$  (data of quartz diorite porphyry are from Chen et al., 2022)

Os年龄,暗示铜钼成矿在( $148.1 \pm 2.0$ ) Ma,与本文获得细粒花岗岩脉的形成年龄( $146 \pm 5.7$ ) Ma一致。这些年龄与区域内的多个斑岩-矽卡岩矿床的成岩成矿时代一致,如冷水沟( $144.2 \pm 0.6$ ) Ma、上元沟( $147.6 \pm 0.9$ ) Ma、园子街( $142.1 \pm 0.6$ ) Ma、下官坊( $142.8 \pm 0.4$  Ma)、小河口( $149 \pm 0.5$ ) Ma、元街沟( $145.7 \pm 1.7$ ) Ma等(图1b),组成了柞水-山阳铜矿集区(Xie et al., 2017; Chen et al., 2022)。多数富Cu岩浆与分异程度中等的闪长质岩浆有关,而富Mo岩浆更多的与花岗质岩浆有关(Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010)。这2类岩浆在柞水-山阳矿集区晚中生代Cu-Mo矿区都有发育,池沟矿区南部以黑云二长花岗岩为主的Mo矿化和北部以石英闪长斑岩为主的Cu矿化(图2,陈雷等,2014; Xie et al., 2015)。传统认为秦岭造山带以钼矿为主,近年来陆续发现不同规模的铜矿,包括北秦岭板厂矿区中黑云母二长花岗斑岩形成Cu-Mo矿床、华北地台南缘八宝山矿区中黑云母二长花岗斑岩形成Fe-Cu矿床等(曾令君等,2013; Li et al., 2024)。池沟新发现的细粒花岗岩脉补充了柞水-山阳矿集区花岗岩成铜矿的案例。

世界范围内报道的超大型斑岩矿床的形成往往与多阶段的岩浆-热液成矿作用叠加有关(薛春纪等,2010; Hong et al., 2021; 陈奇等,2022)。多阶段的岩浆-热液时间持续多则10 Ma以上,少则1 Ma以内(Sillitoe, 1988; Arribas Jr et al., 1995)。比如安第

斯斑岩成矿带铜金矿化最大间隔了1~3 Ma(Sillitoe, 1988);智利北部的成矿带时间跨度在8~13 Ma以上(Francisco et al., 2001)。国内也存在单个成矿事件中周期性的多世代岩浆形成斑岩铜矿床,比如玉龙矿区叠置矿化比斑岩铜矿化超过4 Ma的时间间隔(Hou et al., 2006)。斑岩铜矿床的成矿岩浆和成矿过程可能整体经历了百万年尺度的演化,这使得成矿元素在较长的成矿期内不断地发生富集和沉淀(Chang et al., 2017; Li et al., 2017)。池沟细粒花岗岩与石英闪长斑岩均形成于140~150 Ma内,表现为同期多阶段的岩浆且均与成矿相关。多阶段岩浆的注入使得成矿物质可以有效释放到出溶流体中,并提高斑岩铜矿床的成矿规模(陈奇等,2022)。因此,本文推测同期细粒花岗岩与石英闪长斑岩均可以成矿,池沟矿床具有寻找大型规模铜矿的潜力。鉴于细粒花岗岩产出于ZK701中且孔深1400 m以下均产出(图3),其产状向北部延伸,暗示了矿区北部依然具有寻找铜矿的找矿潜力,建议增加其北部的隐伏岩体的找矿勘查工作。

## 6 结 论

(1) 池沟铜矿新发现的细粒花岗岩脉的锆石U-Pb定年,获得了晚中生代( $146.3 \pm 5.7$ ) Ma的侵入时代,并捕获了大量早古生代和新元古代岩浆锆石,其成岩年龄与石英闪长斑岩一致。

(2) 细粒花岗岩具有高氧逸度和高含水量特征,其成岩年龄与前人所得铜钼矿化的成矿年龄基本一致。鉴于其时空关系和岩体地球化学特征,细粒花岗岩具有形成铜矿的潜力,其多阶段岩浆与成矿特征,推测池沟具有寻找大型模铜矿的找矿潜力。

**致谢** 感谢商洛西北有色七一三总队有限公司工作人员在野外和地质资料中给予的帮助和支持;感谢中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室潘发斌老师在电子探针分析过程中给予的帮助;感谢中国地质科学院矿产资源研究所侯可军老师在锆石U-Pb定年和微量元素分析中给予的指导;感谢审稿人在论文修改过程中提出的建设性意见。

## References

- Arribas Jr A, Hedenquist J W, Itaya T, Okada T, Concepción R A and Garcia Jr J S. 1995. Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines[J]. *Geology*, 23(4): 337-340.
- Cao M P, Yao J M, Deng X H, Yang F J, Mao G Z and Mathur R. 2017. Diverse and multistage Mo, Au, Ag-Pb-Zn and Cu deposits in the Xiong'er Terrane, East Qinling: From Triassic Cu mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 81: 565-574.
- Chang J, Li J W, Selby D, Liu J C and Deng X D. 2017. Geological and chronological constraints on the long-lived Eocene Yulong porphyry Cu-Mo deposit, eastern Tibet: Implications for the lifespan of giant porphyry Cu deposits[J]. *Economic Geology*, 112(7): 1719-1746.
- Chang Z S, Shu Q H and Meinert L. 2019. Skarn deposits of China[J]. Society of Economic Geologists Special Publications, 22: 189-234.
- Chen L, Wang Z Q, Yan Z, Wu F F, Ren T and Guo Y H. 2014. Metallogenesis of 150~140 Ma porphyry-skarn CuMoFe(Au) deposit in Shanyang-Zhashui ore concentration area, Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 415-436(in Chinese with English abstract).
- Chen L, Yan Z, Wang Z Q, Guo X Q, Fu C L and Zeng Z J. 2022. Contributions of juvenile lower crust and mantle components to porphyry Cu deposits in an intracontinental setting: Evidence from Late Mesozoic porphyry Cu deposits in the South Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Mineralium Deposita*, 58(3): 489-509.
- Chen Q, Wang C M, Zhu J X, Du B, Duan H Y, Shi K X, Qian J L and Liu L J. 2022. Advances in research of the time scales of porphyry deposits: A case study of the Yulong porphyry Cu-Mo deposit in the eastern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(1): 109-123(in Chinese with English abstract).
- Chen Z H, Lu S N, Li H K, Li H M, Xiang Z Q, Zhou H Y and Song B. 2006. Constraining the role of the Qinling Orogen in the assembly and break-up of Rodinia: Tectonic implications for Neoproterozoic granite Occurrences[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(1): 99-115.
- Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, Liu X M, Genser J and Hauzenberger C. 2011. Tectonic evolution of the Qinling Orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213-237.
- Ferry J M and Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429-437.
- Francisco C and John H D. 2001. A special issue devoted to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. *Economic Geology*, 96(2): 233-237.
- Gao S, Zhang B R, Gu X M, Xie Q L, Gao C L and Guo X M. 1995. Silurian-Devonian provenance changes of South Qinling Basins: Implications for accretion of the Yangtze (South China) to the North China Cratons[J]. *Tectonophysics*, 250(1-3): 183-197.
- Ge R F, Wilde S A, Zhu W B and Wang X L. 2023. Earth's early continental crust formed from wet and oxidizing arc magmas[J]. *Nature*, 623(7986): 334-339.
- Gong H J, Zhu L M, Sun B Y and Guo B. 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of the Shahewan, Caoping and Zhashui granitic plutons in the South Qinling orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 248-264(in Chinese with English abstract).
- Hong T, Hollings P, Zhai M G, Wang Y X, Xu X W, Gao J and Wang Y J. 2021. Superimposed mineralization in the deformed Yuleken-halasu porphyry Cu-Mo deposit (Northwest China): Rb-Sr geochronology, S isotope, and trace element analysis of chalcopyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 135: 104226.
- Hoskin P W O, Schaltegger U, Hanchar J M and Hoskin P W O. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27-62.
- Hou Z Q, Yang Z M, Wang R and Zheng Y C. 2020. Further discussion on porphyry Cu-Mo-Au deposit formation in Chinese mainland[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 20-44(in Chinese with English abstract).
- Konzett J, Armstrong R A, Sweeney R J and Compston W. 1998. The timing of marid metasomatism in the Kaapvaal mantle: An ion probe study of zircons from marid xenoliths[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 160(1-2): 133-145.
- Li N, Chen Y J, Santosh M and Pirajno F. 2015. Compositional polarity of Triassic granitoids in the Qinling Orogen, China: Implication for termination of the northernmost Paleo-Tethys[J]. *Gondwana Research*, 27(1): 244-257.
- Li Y, Selby D, Condon D and Tapster S. 2017. Cyclic magmatic-hydrothermal evolution in porphyry systems: High-precision U-Pb and Re-Os geochronology constraints on the Tibetan Qulong porphyry Cu-Mo deposit[J]. *Economic Geology*, 112(6): 1419-1440.
- Li Z Y, Xie G Q, Li S L and Wei Y. 2024. Geology and geochronology of the Banchang distal Cu-Mo skarn deposit, Central China[J].

- Mineralium Deposita, 59(6): 1185-1205.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257(1-2): 34-43.
- Lu X X, Yu Z P, Feng Y L and Ma W F. 2002. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in East Qinling Mountain[J]. Mineral Deposits, 21(2): 168-178(in Chinese with English abstract).
- Loucks R R, Fiorentini M L and Henriquez G J. 2020. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon[J]. Journal of Petrology, 61(3): 1-30.
- Lowell J D and Guilbert J M. 1970. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits[J]. Economic Geology, 65(4): 373-408.
- Mao J W, Goldfarb R, Zhang Z W, Xu W Y, Qiu Y M and Deng J. 2002. Gold deposits in the Xiaoqinling-Xiong'ershan region, Qinling Mountains, Central China[J]. Mineralium Deposita, 37(3-4): 306-325.
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qü W J, Du A D, Ye H S, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F and Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie Orogenic Belt[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(18): 4607-4626.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[J]. Economic Geology, 41: 299-336.
- Meng Q R and Zhang G W. 1999. Timing of collision of the North and South China Blocks: Controversy and reconciliation[J]. Geology, 27(2): 123-126.
- Meng Q R and Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling Orogen, Central China[J]. Tectonophysics, 323(3-4): 183-196.
- Ren T, Wang R T, Xie G Q, Li J B, Dai J Z, Guo Y H, Dang K F and Wu X Q. 2014. Geochemistry and rock forming and ore forming epochs of Chigou Cu porphyry deposit in Shaanxi Province, and their implications[J]. Mineral Deposits, 33(4): 807-820(in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 2021. Porphyry copper deposit formation in Arcs: What are the Odds[J]. Geosphere, 1(18): 130-155.
- Seedorff E, Dilles J H, Proffett J M, Einaudi M T, Zurcher L, Stavast W J A, Johnson D A and Barton M D. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene Features[J]. One Hundredth Anniversary Volume, 100: 251-298.
- Sillitoe R H. 1988. Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes[J]. Journal of South American Earth Sciences, 1(1): 89-108.
- Sillitoe R H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the Circum-Pacific region[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 44(3): 373-388.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 105(1): 3-41.
- Sun W D, Huang R F, Li H, Hu Y B, Zhang C C, Sun S J, Zhang L P, Ding X, Li C Y, Zartman R E and Ling M X. 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas[J]. Ore Geology Reviews, 65: 97-131.
- Sun W D. 2020. Oxygen fugacity of Earth[J]. Geochimica, 49(1): 1-20 (in Chinese with English abstract).
- Wang D Z, Hu R Z, Hollings P, Bi X W, Zhong H, Pan L C, Leng C B, Huang M L and Zhu J J. 2021. Remelting of a Neoproterozoic Arc Root: Origin of the Pulang and Songnuo porphyry Cu deposits, Southwest China[J]. Mineralium Deposita, 56(6): 1043-1070.
- Wang K, Dong S W, Yao W H, Zhang Y Q, Li J H, Cui J J and Han B F. 2020. Xenocrystic / Inherited Precambrian zircons entrained within igneous rocks from eastern South China: Tracking unexposed ancient crust and implications for Late Paleoproterozoic orogenesis[J]. Gondwana Research, 84: 194-210.
- Wang R, Richards J P, Hou Z, Yang Z, Gou Z and Dufrane S A. 2014. Increasing magmatic oxidation state from Paleocene to Miocene in the eastern Gangdese Belt, Tibet: Implication for collision-related porphyry Cu-Mo±Au Mineralization[J]. Economic Geology, 109(7): 1943-1965.
- Wang R T, Li J B, Ren T, Yang Z H, Mao J W and Wang T. 2008. Metallogenetic conditions and prospecting potential of the Zhashui-Shanyang polymetal ore cluster[J]. Geology in China, 35(6): 1291-1298(in Chinese with English abstract)
- Wang X X, Wang T and Zhang C L. 2015. Granitoid Magmatism in the Qinling orogen, Central China and its bearing on orogenic evolution[J]. Science China Earth Sciences, 58(9): 1497-1512.
- Wang Z Q, Yan Q R, Yan Z, Wang T, Jiang C F, Gao L D, Li Q G, Chen J L, Zhang Y L, Liu P, Xie C L and Xiang Z J. 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling Orogen Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 83(11): 1527-1546(in Chinese with English abstract).
- Waters L E and Lange R A. 2015. An updated calibration of the plagioclase-liquid hygrometer-thermometer applicable to basalts through rhyolites[J]. American Mineralogist, 100(10): 2172-2184.
- Wu F F, Wang Z Q, Yan Z, Chen L, Xia C L, Guo Y H and Peng Y M. 2014. Geochemical characteristics, zircons U-Pb ages and Lu-Hf isotopic composition of the Yanshanian intermediate-acidic plutons in the Shanyang-Zhashui areas, Qinling Orogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(2): 451-471(in Chinese with English abstract).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589 (in Chinese).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu Orogenic Belt in Central China[J]. Gondwana Research, 23(4): 1402-1428.
- Xie G Q, Ren T, Li J B, Wang R T, Xia C L, Guo Y H, Dai J Z and Shen Z C. 2012. Zircon U-Pb age and petrogenesis of ore-bearing granitoid for the Chigou Cu-Mo deposit from the Zhashan basin, Shaanxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica 28(1): 15-26(in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- Xie G Q, Mao J W, Wang R T, Ren T, Li J B and Da J Z. 2015. Origin of Late Mesozoic granitoids in the newly discovered Zha-Shan porphyry Cu district, South Qinling, Central China, and implications for regional metallogeny[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 103: 184-197.
- Xie G Q, Mao J W, Wang R T, Meng D M, Sun J, Dai J Z, Ren T, Li J B and Zhao H J. 2017. Origin of the Lengshuigou porphyry-skarn Cu deposit in the Zha-Shan district, South Qinling, Central China, and implications for differences between porphyry Cu and Mo deposits[J]. Mineralium Deposita, 52(4): 621-639.
- Xu D L, Deng X, Peng L H, Tian Y, Jin W and Jin X B. 2023. The components of the subducted continental basement within the Dabie-shan orogenic belt as evidenced by xenocrystic/inherited zircons from Cretaceous dykes[J]. Earth Science Frontiers, 30(4): 299-316 (in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Zhao Z F, Wu G G, Dong L H, Feng J, Zhang Z C, Zhou G, Chi G X and Gao J G. 2010. The multiperiodic superimposed porphyry copper mineralization in Central Asian tectonic region: A case study of geology, geochemistry and chronology of Halasut copper deposit, southeastern Altai, China[J]. Earth Science Frontiers, 17(2): 53-82(in Chinese with English abstract).
- Yang H, Qin K Z, Wu P, Wang F and Chen F C. 2023. Tectonic setting, mineralization and ore-controlling factors of porphyry Cu-Mo-Au deposits[J]. Mineral Deposits, 42(1): 128-156(in Chinese with English abstract).
- Yang H M, Du Y S, Lu Y H, Chen L J, Zheng Z J and Zhang Y. 2016. U-Pb and Re-Os geochronology of the Hucunnan copper-molybdenum deposit in Anhui Province, Southeast China, and its geological implications[J]. Resource Geology, 66(3): 303-312.
- Yang Z M and Cooke D R. 2019. Porphyry copper deposits in China[J]. Society of Economic Geologists, 22: 133-187.
- Zeng L J, Xing Y C, Zhou D, Zhao T P, Yao J M and Bao Z W. 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Babaoshan granite porphyries in Lushi County, Henan Province[J]. Geotectonics and Metallogeny, 37(1): 65-77(in Chinese with English abstract).
- Zhang G W. 2001. Qinling orogeny and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhang G W, Guo A L, Dong Y P and Yao A P. 2019. Rethinking of the Qinling orogen[J]. Journal of Geomechanics 25(5): 746-768(in Chinese with English abstract).
- Zhang H, He J, Li Y, Wu G, Cheng H and Chen F. 2023. Neoproterozoic crustal growth and reworking in South Qinling, Central China: Evidence from zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of petrogenesis in the Foping Dome[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 256: 105784.
- Zhang Z Y, Wang Y, Liu J and Zhang F. 2020. Geology, fluid inclusions, and H-O-S-Pb isotopes of the Chigou porphyry Cu deposit in southern Qinling, Central China: Implication for ore genesis[J]. Ore Geology Reviews, 126: 103723.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Zhang M, Pearson N and Pan Y M. 2006. Widespread Archean basement beneath the Yangtze Craton[J]. Geology, 34(6): 417-420.
- ### 附中文参考文献
- 陈雷,王宗起,闫臻,吴发富,任涛,郭延辉. 2014. 秦岭山阳-柞水矿区 150~140 Ma 斑岩-矽卡岩型 CuMoFe(Au) 矿床成矿作用研究[J]. 岩石学报, 30(2): 415-436.
- 陈奇,王长明,祝佳萱,杜斌,段泓羽,石康兴,钱金龙,刘俐君. 2022. 斑岩矿床成矿时间尺度的研究进展:以藏东玉龙斑岩铜(钼)矿床为例[J]. 岩石学报, 38(1): 109-123.
- 弓虎军,朱赖民,孙博亚,李犇,郭波. 2009. 南秦岭沙河湾、曹坪和柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(2): 248-264.
- 侯增谦,杨志明,王瑞,郑远川. 2020. 再论中国大陆斑岩 Cu-Mo-Au 矿床成矿作用[J]. 地学前缘, 27(2): 20-44.
- 卢欣祥,于在平,冯有利,王义天,马维峰. 2002. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景[J]. 矿床地质, 21(2): 168-178.
- 任涛,王瑞廷,谢桂青,李剑斌,代军治,郭延辉,党勘峰,武晓琴. 2014. 陕西池沟斑岩型铜矿床含矿岩体地球化学特征、成岩成矿时代及其意义[J]. 矿床地质, 33(4): 807-820.
- 孙卫东. 2020. 地球氧逸度[J]. 地球化学, 49(1): 1-20.
- 王瑞廷,李剑斌,任涛,杨智慧,毛景文,王涛. 2008. 柞水-山阳多金属矿区成矿条件及找矿潜力分析[J]. 中国地质, 35(6): 1291-1298.
- 王宗起,闫全人,闫臻,王涛,姜春发,高联达,李秋根,陈隽璐,张英利,刘平,谢春林,向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J]. 地质学报, 83(11): 1527-1546.
- 吴发富,王宗起,闫臻,陈雷,夏长玲,郭延辉,彭远民. 2014. 秦岭山阳-柞水地区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 30(2): 451-471.
- 吴元保,郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其 U-Pb 年解的制约[J]. 科学通报, 16(49): 1589.
- 谢桂青,任涛,李剑斌,王瑞廷,夏长玲,郭延辉,代军治,申志超. 2012. 陕西柞山盆地池沟铜钼矿区含矿岩体的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因[J]. 岩石学报, 28(1): 15-26.
- 徐大良,邓新,彭练红,田洋,金巍,金鑫镖. 2023. 大别山碰撞造山带俯冲盘陆壳基底组成:白垩纪脉岩捕获/继承锆石的证据[J]. 地学前缘, 30(4): 299-316.
- 薛春纪,赵战锋,吴淦国,董连慧,冯京,张招崇,周刚,池国祥,高景岗. 2010. 中亚构造域多期叠加斑岩铜矿化:以阿尔泰东南缘哈腊苏铜矿床地质、地球化学和成岩成矿时代研究为例[J]. 地学前缘, 17(2): 53-82.
- 杨航,秦克章,吴鹏,王峰,陈福川. 2023. 斑岩铜-钼-金矿床:构造环境、成矿作用与控制因素[J]. 矿床地质, 42(1): 128-156.
- 曾令君,星玉才,周栋,赵太平,姚军明,包志伟. 2013. 河南卢氏八宝山花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成特征[J]. 大地构造与成矿学, 37(1): 65-77.
- 张国伟. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京:科学出版社.
- 张国伟,郭安林,董云鹏,姚安平. 2019. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 25(5): 746-768.