

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04006

葛战林,高永宝,郑艳荣,郝迪,董阳阳,2022. 东秦岭杨斜金矿区石英闪长玢岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义. 沉积与特提斯地质, 42(4):598-612. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04006

GE Z L, GAO Y B, ZHENG Y R, HAO D, DONG Y Y, 2022. Zircon U-Pb isotopic geochronology, geochemistry and geological significance of the quartz diorite porphyrite in Yangxie gold ore district, East Qinling. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4):598-612. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04006

东秦岭杨斜金矿区石英闪长玢岩锆石 U-Pb 年代学、 地球化学特征及地质意义

葛战林^{1,2}, 高永宝^{1,3*}, 郑艳荣¹, 郝迪¹, 董阳阳¹

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:杨斜中型金矿床是东秦岭杨斜-丰北河地区典型的石英脉型金矿床,成矿与区内石英闪长玢岩密切相关,具中高温蚀变特征及矿物组成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明,石英闪长玢岩锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 149.5 ± 2.7 Ma, 谐和年龄为 149.5 ± 2.1 Ma, 属晚侏罗世。岩石地球化学研究显示,石英闪长玢岩具有高 SiO₂ (65.53% ~ 65.76%)、高 Al₂O₃ (15.65% ~ 15.87%)、富碱(N₂O + K₂O = 8.07% ~ 8.30%)及贫 MgO (1.37% ~ 1.40%) 特征,属于高钾钙碱性准铝质系列岩石;相对富集 Rb、Ba、K、Pb、Sr 等大离子亲石元素和 LREE,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素和 HREE;其高 Sr、高 Sr/Y、低 Y 和低 Yb 值及正 Eu 异常等特征参数,与典型埃达克质岩一致,岩浆应起源于加厚下地壳的部分熔融。综合研究认为,杨斜金矿属岩浆期后热液型金矿床,成岩成矿时代一致,形成于秦岭造山带晚侏罗世—早白垩世陆内俯冲向伸展转换的构造环境。

关键词:东秦岭;杨斜金矿区;石英闪长玢岩;锆石 U-Pb 定年;地球化学

中图分类号:P618.51; P588.1; P597.3

文献标识码:A

Zircon U-Pb isotopic geochronology, geochemistry and geological significance of the quartz diorite porphyrite in Yangxie gold ore district, East Qinling

GE Zhanlin^{1,2}, GAO Yongbao^{1,3*}, ZHENG Yanrong¹, HAO Di¹, DONG Yangyang¹

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Xi'an Center, China Geological Survey, Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an 710054, China)

Abstract: The middle-sized Yangxie gold deposit is a typical quartz-vein type gold deposit in Yangxie-Fengbeihe area, East Qinling. Its mineralization is closely related to quartz diorite porphyrite, which has the characteristics of medium-high temperature alteration and mineral composition. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating indicates that the

收稿日期: 2021-09-08; 改回日期: 2021-11-26 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 葛战林(1992—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事矿床学及矿床地球化学研究。E-mail: gezhanlin@163.com

通讯作者: 高永宝(1982—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事矿床学及矿床地球化学研究。E-mail: gaoyongbao2006@126.com

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20191013)

weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age and concordance age of zircons from the quartz diorite porphyrite are 149.5 ± 2.7 Ma and 149.5 ± 2.1 Ma respectively, suggesting the Late Jurassic. Petrogeochemical studies show that the quartz diorite porphyrite belongs to high K calc-alkaline metaluminous rocks which are characterized by high contents of SiO_2 (65.53% ~ 65.76%), Al_2O_3 (15.65% ~ 15.87%) and alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.07\% \sim 8.30\%$) but low MgO content (1.37% ~ 1.40%). These rocks are relatively enriched in LILE (Rb, Ba, K, Pb, Sr) and LREE, and depleted in HFSE (Nb, Ta, Ti) and HREE. Meanwhile, their characteristic parameters of high Sr values, high Sr/Y ratios, low Y and Yb values as well as positive Eu anomalies are consistent with those of typical adakitic rocks, indicating that the parental magma was probably derived from partial melting of the thickened lower crust. The comprehensive studies suggest that the Yangxie gold deposit is a magmatic-hydrothermal gold deposit, which was formed in the transitional environment of intracontinental subduction to extension of the Qinling orogenic belt from Late Jurassic to Early Cretaceous.

Key words: East Qinling; Yangxie gold deposit; quartz diorite porphyrite; zircon U-Pb dating; geochemistry

0 引言

秦岭造山带长期复杂的大陆动力学机制主导成矿作用与构造演化-岩浆活动相耦合,使其成为我国 Au、Ag、Mo、Pb、Zn 等重要矿产资源基地(陈毓川等,1994;姚书振等,2002;张国伟等,2019)。中新世代,秦岭与中国大陆的构造体制由近 EW 转换为古太平洋板块向欧亚板块之下俯冲的 NE-NEE 向(张国伟等,2001;毛景文等,2005);在这一动力学系统转换背景下,东秦岭发生大规模与岩浆活动有关的晚侏罗世-早白垩世(J_3-K_1)陆内金多金属成矿事件。前人研究多聚焦于该时期华北板块南缘和北秦岭的斑岩-矽卡岩型钼(钨)矿床、热液脉型金矿床,以及南秦岭与中生代构造-岩浆岩有关的铜钼金矿床的成岩成矿时代、矿床成因及岩浆演化等(黄典豪等,1994;Mao et al., 2002;李诺等,2007;王晓霞等,2011;吴发富等,2014;刘凯等,2019),关于商丹断裂带 J_3-K_1 金钨成矿与岩浆作用的关系研究略微薄弱。

东秦岭商丹断裂带杨斜-丰北河地区处于南、北秦岭的交汇部位,近年来,相继在印支期花岗岩带附近发现多处中小型热液脉型金、钨矿床。杨斜金矿床即为其中典型代表之一,成矿与岩浆作用密切相关,具钾化、硅化等中高温蚀变特征及 Au-Ag-Te-W 矿化(余晓红,2017;马承等,2021)。但与金成矿有关的岩浆作用研究较为薄弱,因此,本文选择与成矿关系密切的石英闪长玢岩为研究对象,通过岩相学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学的研究,探讨成岩成矿时代、岩石成因与岩浆源区,进一步探索成矿构造环境,以期为区域金矿成矿规律研究及下一步勘查工作提供借鉴。

1 地质背景

1.1 区域地质背景

秦岭造山带位于中央造山带的核心地段(图 1a),以区域洛南-栾川、商丹和勉略断裂为界,由北至南可划分为华北板块南缘、北秦岭、南秦岭及扬子板块北缘 4 个构造带(Zhang et al., 1995; Meng and Zhang, 2000),地理上大致以宝(鸡)-成(都)铁路区划为东秦岭与西秦岭造山带(图 1b)。东秦岭杨斜-丰北河地区以商丹主干断裂为界,北部为北秦岭逆冲构造带,南部为绿片岩相-低角闪岩相变质的商丹带主要地质实体(图 1c)。

区域地层由北至南出露元古宇、下古生界和上古生界。古元古界秦岭岩群郭庄岩组(Pt_1g)和中新元古界松树沟组($Pt_{2-3}s$)零星分布于区域北部,前者岩性为混合岩化石榴黑云斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩夹浅粒岩、变粒岩、斜长角闪岩;后者主要为变质基性火山岩夹少量碎屑岩。下古生界呈近 EW 向带状展布,丹凤岩群(Pz_1D)为一套绿片岩相-低角闪岩相变质火山-沉积岩,是商丹蛇绿混杂岩带的主要组成部分,属于古火山岛弧环境产物(赵东宏等,2019);罗汉寺组(Pz_1l)为弧前盆地沉积的变质火山岩夹碎屑岩。泥盆-石炭系(D-C)仅在区域南部出露,岩性为滨浅海沉积相的碎屑岩夹碳酸盐岩组合。

区内岩浆活动强烈,以南部印支期花岗岩带分布最为广泛,由西至东分别为东江口、柞水、曹坪和沙河湾花岗岩,主体属于准铝质-过铝质钙碱性或高钾钙碱性 I 型花岗岩,成岩年龄集中于 230 ~ 210 Ma(弓虎军等,2009;Hu et al., 2017)。此外,秦王山镁铁质杂岩体呈 EW 向延长的豆荚状出露于区域

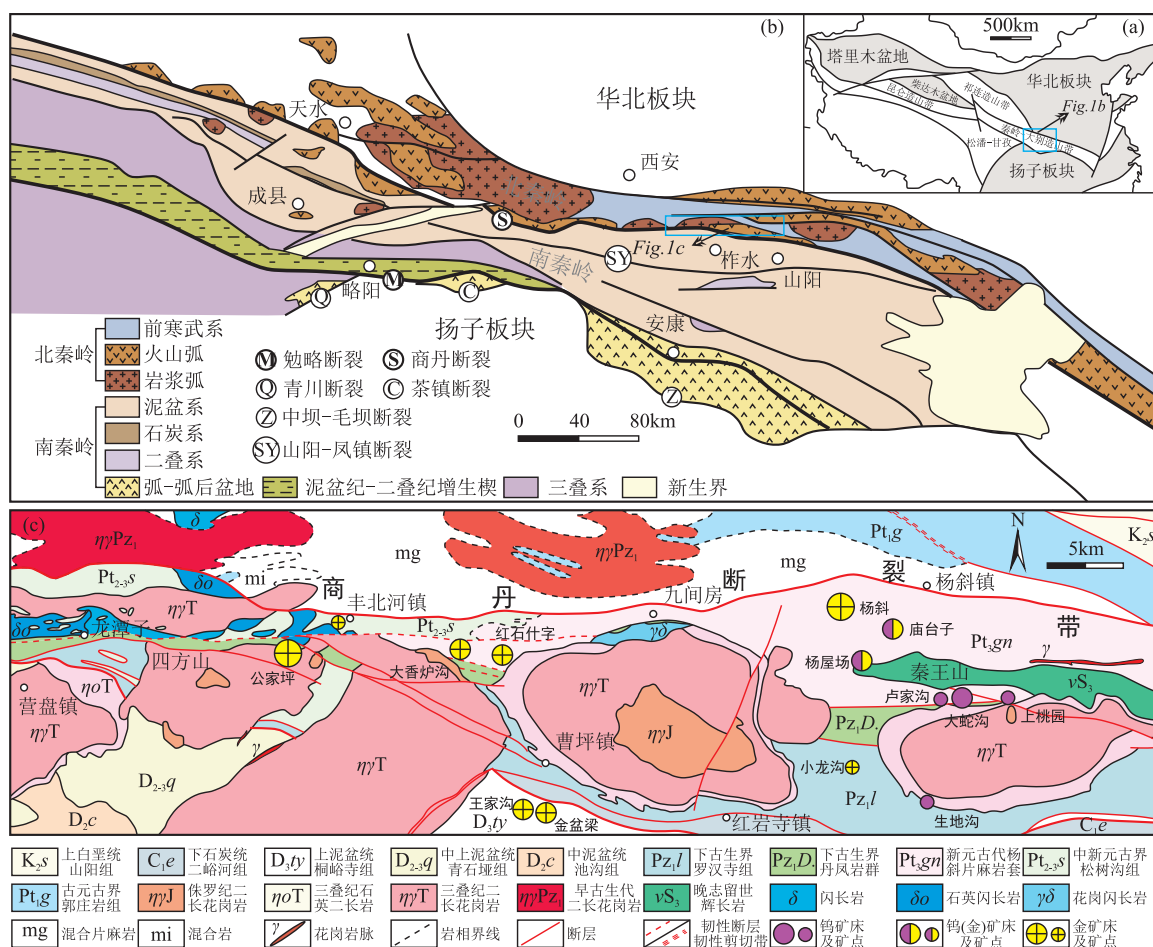


图1 秦岭造山带位置(a)、秦岭造山带大地构造图(b,据 Yan et al., 2006)及杨斜-丰北河区域地质简图(c,据陕西省地质调查院,2017 修改)

Fig.1 Tectonic map of China, showing the location of the Qinling Orogen (a), tectonic framework of the Qinling Orogen (b, modified from Yan et al., 2006) and geological sketch map of the Yangxie-Fengbeihe area (c, modified from Shaanxi Institute of Geology Survey, 2017)

东部,主要由辉长岩、苏长辉长岩和闪长岩组成,闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 422 ± 7 Ma,形成于晚志留世岛弧环境(刘军锋等,2009)。

丰北河-杨斜断裂(商丹断裂)为区内主干构造。断裂破碎带宽数十米至百余米,呈 EW 向延伸约 70 km,断面多北倾,倾角 $50^\circ \sim 78^\circ$,具有多期活动和控岩控矿特征。研究区大小石英脉型金、钨矿床(点)多达 10 余处,典型矿床包括公家坪金矿床、杨斜金矿床、杨屋场钨(金)矿床和大蛇沟钨矿床等,均分布于商丹断裂带南侧(图 1c),受主干断裂及其次级断裂控制(葛战林等,2020)。

1.2 矿床地质

杨斜金矿床隶属陕西省商洛市杨斜镇管辖,石英脉型矿体集中分布于东、西矿区的贾沟、寺沟、大水岔、郭安沟、小西沟、庙沟及神凹等矿点(图 2)。

矿脉受 NE—NNE 与 NW—NNW 向两组张扭性断裂破碎带控制,赋矿围岩为新元古代杨斜片麻岩套。区内岩浆岩以秦王山镁铁质杂岩体及脉岩为主,脉岩包括伟晶岩脉、花岗斑岩脉、石英闪长玢岩脉和煌斑岩脉等。

杨斜金矿区共圈定金矿体 18 个,矿化体 2 个(图 3a,b)。东矿区矿体形态呈脉状,赋存于 NW—NNW 向断裂破碎带中,显示右行侧列特征,总体倾向 NE—NEE,倾角 $72^\circ \sim 82^\circ$;单矿体一般长 115 ~ 300 m,厚 0.84 ~ 1.25 m, Au 品位为 4.54 ~ 8.65 g/t。西矿区矿体为充填于 NW—NNW 或 NE 向的含金石英单脉,倾向 S 或 N,倾角 $65^\circ \sim 89^\circ$;矿脉长 160 ~ 500 m,厚 0.64 ~ 1.10 m, Au 品位为 3.12 ~ 6.07 g/t。矿石中金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿,次为方铅矿和黝铜矿,含少量自然金;非金属矿物以

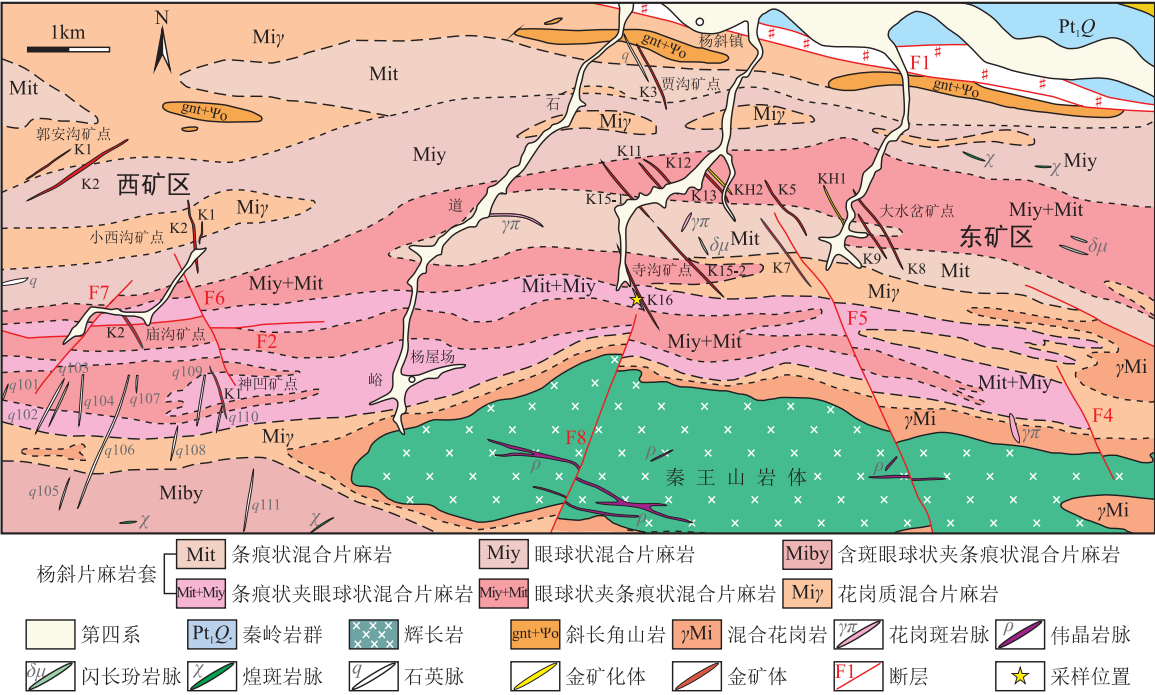
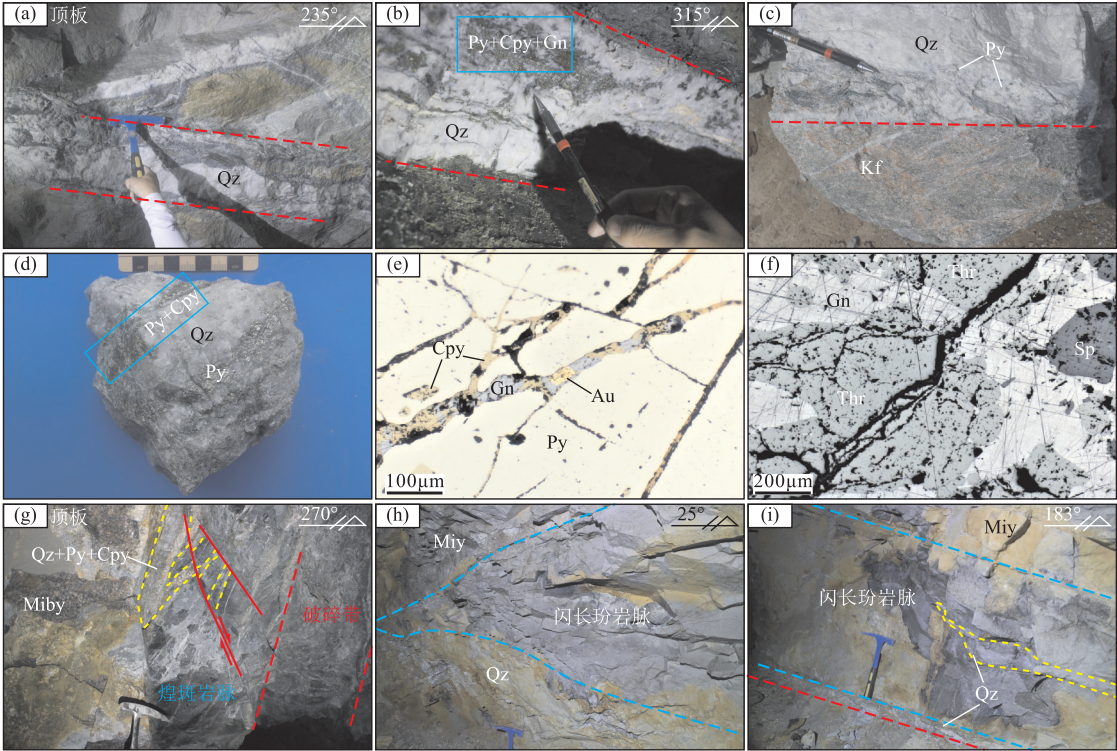


图2 杨斜金矿床地质图(据马承等,2021 修改)

Fig.2 Geological map of the Yangxie gold deposit (modified from Ma et al., 2021)



a, b. 石英脉型金矿体;c. 稀疏浸染状构造;d. 细脉状构造;e. 裂隙金,黄铜矿沿裂隙交代半自形黄铁矿(反射光);f. 交代结构,方铅矿交代黝铜矿呈港湾状(反射光);g. 石英-多金属硫化物脉沿裂隙贯入煌斑岩脉;h. 含金石英脉截切石英闪长玢岩脉;i. 含金石英脉与石英闪长玢岩脉近平行产出,局部穿插后者。Miy—眼球状混合片麻岩;Miby—含斑眼球状混合片麻岩;Au—自然金;Py—黄铁矿;Cpy—黄铜矿;Thr—黝铜矿;Sp—闪锌矿;Gn—方铅矿;Kf—钾长石;Qz—石英

图3 典型矿体、矿石组构特征及矿脉与岩脉穿插关系

Fig.3 Characteristics of typical orebodies, ore fabric and relationships between gold-bearing quartz veins and dykes

石英、钾长石和绢云母为主。矿石构造包括脉状、细脉-网脉状、浸染状、斑杂状和角砾状构造等(图3c、d);矿石结构以自形-半自形、他形、固溶体分离、交代和包含结构为主(图3e、f)。围岩蚀变类型主要有钾化、硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化及碳酸盐化,以前三者与金成矿关系最为密切。

矿区含金石英脉与中基性岩脉的空间赋存关系紧密,多处可见其与石英闪长玢岩脉、煌斑岩脉近平行产出于同一构造带,但局部穿插或截切岩脉(图3g-i),指示金成矿时限同期或略晚于上述岩脉的侵位。

2 实验样品与测试方法

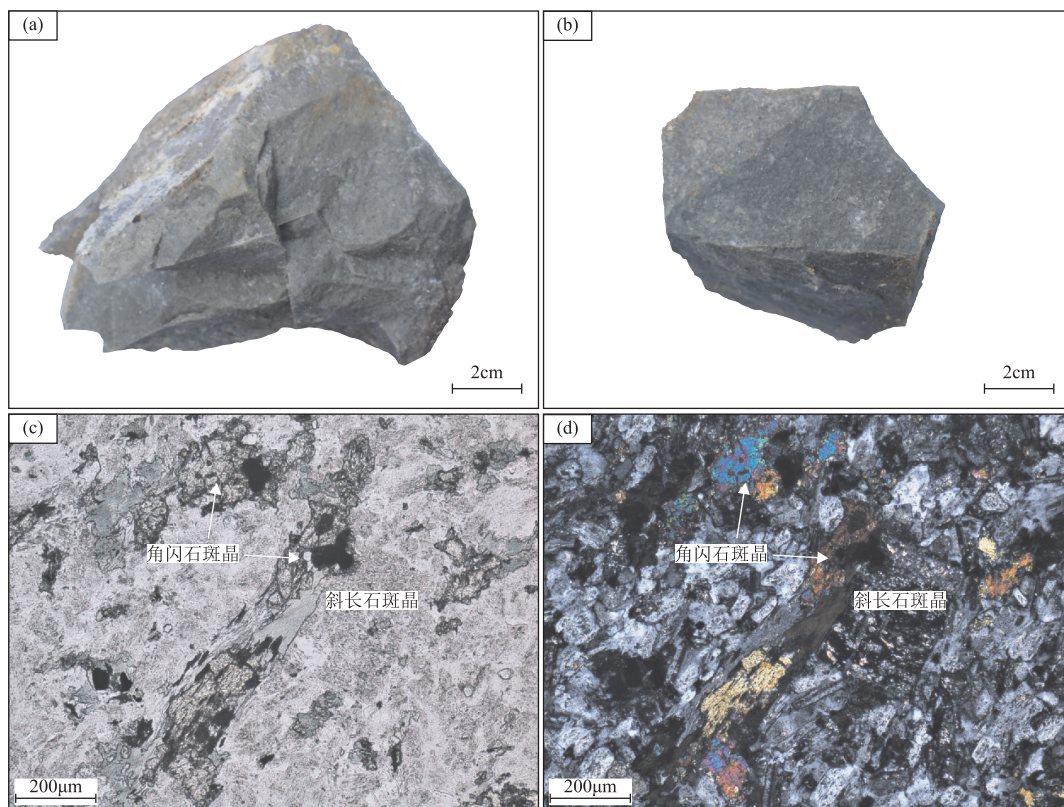
2.1 实验样品

本次研究样品采自于寺沟 K16 矿体平硐内的石英闪长玢岩脉(图2),包括1件锆石 U-Pb 定年样品(DG-Zr)和5件岩石地球化学样品(DG-1, 2, 3, 4, 5),地理坐标为 33°49'29"N, 109°40'03"E。石英闪长玢岩呈灰色,斑状结构,块状构造(图4a、b)。斑晶主要为角闪石(4%)和斜长石(2%),角闪石斑

晶多呈半自形柱状,粒径大小约 0.48 ~ 1.62 mm,绿泥石化、绿帘石化强烈(图4c),已由蚀变矿物交代呈假象;斜长石斑晶呈半自形板柱状,粒径大小约 0.50 ~ 1.40 mm,具聚片双晶,见绢云母化(图4d)。基质包括斜长石(75%)、角闪石(10%)、石英(5%~8%)和金属矿物(2%)等,其中斜长石呈半自形板条状,粒径大小约 0.02 ~ 0.18 mm,具聚片双晶,绢云母化较强;角闪石呈他形粒状-半自形柱状,粒径大小约 0.06 ~ 0.30 mm,绿泥石化、绿帘石化及碳酸盐化强烈,见铁质析出;石英呈他形粒状分布于斜长石晶粒间,粒径大小约 0.03 ~ 0.14 mm;金属矿物呈他形-半自形粒状,粒径大小约 0.01 ~ 0.20 mm,主要为暗色矿物蚀变的产物,副矿物为磷灰石。

2.2 测试方法

锆石挑选、制靶、透反射及阴极发光(CL)照相在西安瑞石地质科技服务有限公司完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,激光剥蚀系统为 RESolution S155-LR 型 193 nm 紫外准分子系统,ICP-MS 设备为



a, b. 石英闪长玢岩手标本照片;c. 角闪石和斜长石斑晶(单偏光);d. 斜长石斑晶见强绢云母化(正交偏光)

图4 石英闪长玢岩岩相学特征

Fig. 4 Petrographic characteristics of quartz diorite porphyrite

Agilent 7900 质谱仪。选用激光斑束直径为 30 μm , 频率为 5 Hz, 激光能量密度为 6 J/ cm^2 , 高纯氦气作为载气。实验采用 NIST610、GJ-1 和 Plešovice 作为标样, NIST610 对仪器进行最佳化控制且为元素含量测定的外标, GJ-1 为定年外标, Plešovice 为监控标样。采样方式为单点剥蚀, 每测定 5 个样品点测定两次标准锆石 GJ-1。锆石同位素比值及元素含量采用 ICPMSDataCal 软件进行计算 (Liu et al., 2008), 年龄计算及谐和图采用 Isoplot 4.15 完成。

主量和微量元素分析在有色金属西北矿产地质测试中心完成。主量元素采用 X 荧光光谱法 (XRF) 测定, 仪器为荷兰帕纳科公司的 PW4400/40 X 射线荧光光谱仪, 分析精度优于 5%。微量元素采用等离子体质谱 (ICP-MS) 分析酸溶法配置的样

品溶液, 仪器为美国 Agilent 7700X 电感耦合等离子质谱仪, 分析精度优于 10%。

3 测试结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

3.1.1 锆石特征

根据锆石结晶习性、透反射光和阴极发光图像特征 (图 5), 结合锆石 U-Pb 年龄, 将石英闪长玢岩中的锆石分为岩浆锆石和捕获锆石两类。

岩浆锆石晶棱清晰且透明度较好, 多呈米黄色自形-半自形短柱状或长柱状, 长 60 ~ 130 μm , 宽 40 ~ 80 μm , 长宽比约为 1:1 ~ 3:1。锆石阴极发光 (CL) 强度中等至强, 具有典型的岩浆成因锆石震荡环带, 无核边结构且未发现明显的后期热液改造现

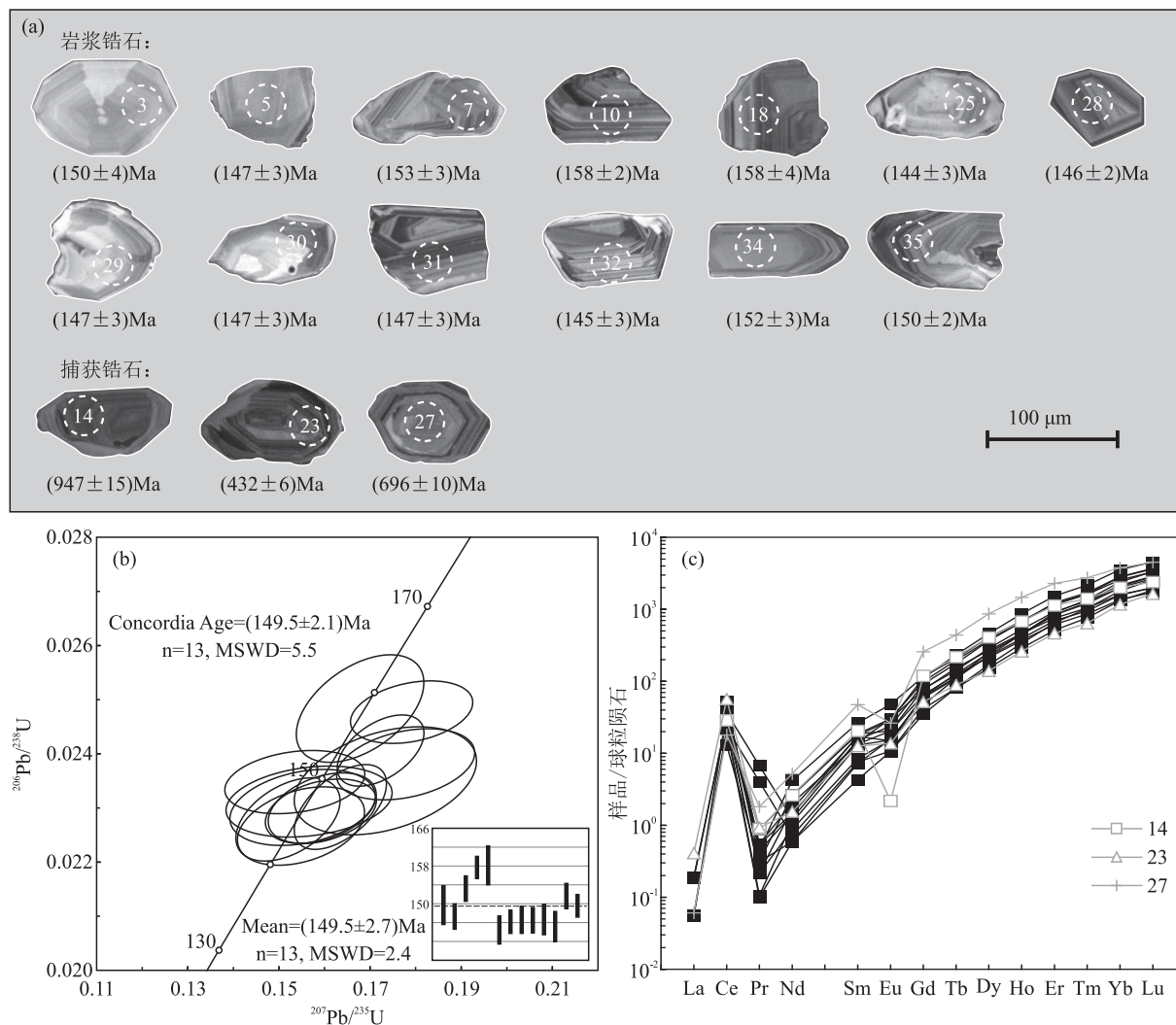


图 5 石英闪长玢岩锆石 CL 图像 (a)、U-Pb 年龄谐和图 (b) 和稀土元素球粒陨石标准化配分曲线 (c)

Fig. 5 CL images (a), U-Pb concordia diagrams (b) and chondrite-normalized REE patterns (c) of zircons from quartz diorite porphyrite

象(图 5a)。

捕获锆石晶棱清楚或边部略具磨圆,透射光颜色为深黄色,呈短柱状自形-半自形晶,长 90~110 μm ,宽 50~60 μm ,长宽比约为 2:1。CL 图像中,阴极发光强度较弱,具有明显的核边结构(图 5a),或是边部发生变质重结晶且切割核部原锆石的震荡环带,或是边部晚期的震荡环带切割核部原岩浆锆石环带。

3.1.2 锆石 U-Pb 年龄及稀土元素特征

本次对样品 35 颗锆石的 35 个测点进行 LA-ICP-MS U-Pb 分析,共获取谐和度大于 90% 的有效测点数据 16 个,其中,岩浆锆石测点 13 个,捕获锆石测点 3 个(附表 1*)。

测年结果表明,岩浆锆石的 13 个测点数据在 U-Pb 年龄谐和图上均分布于谐和线及其附近(图 5b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 144~158 Ma 之间,计算获得的谐和年龄为 149.5 ± 2.1 Ma (MSWD = 5.5, $n = 13$),加权平均年龄为 149.5 ± 2.7 Ma (MSWD = 2.4, $n = 13$),两者年龄一致,表明杨斜金矿区石英闪长玢岩的结晶年龄为 149.5 Ma,属于晚侏罗世岩浆活动的产物。13 颗锆石的 ^{232}Th 、 ^{238}U 含量分别为 $68 \times 10^{-6} \sim 280 \times 10^{-6}$ 、 $144 \times 10^{-6} \sim 919 \times 10^{-6}$,Th/U 值为 0.15~0.52,显示岩浆成因锆石特征,与 CL 图像结论一致。锆石稀土总量较高($\Sigma \text{REE} = 459.20 \times 10^{-6} \sim 1259.77 \times 10^{-6}$)且变化较大(附表 2*),稀土元素配分曲线相似,表现为轻稀土(LREE)相对亏损,重稀土(HREE)强烈富集,具有显著的 Ce 正异常、弱 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.46 \sim 0.92$)(图 5c),暗示锆石晶出的母源岩浆未发生显著的斜长石分离结晶(Hoskin and Schaltegger, 2003)。

捕获锆石 14、23 和 27 号测点均位于核部,获取的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 947 ± 15 Ma、 432 ± 6 Ma 和 696 ± 10 Ma,代表了闪长质岩浆侵位过程中捕获的围岩锆石年龄。3 颗锆石 ^{232}Th 、 ^{238}U 含量分别为 $96 \times 10^{-6} \sim 541 \times 10^{-6}$ 、 $221 \times 10^{-6} \sim 896 \times 10^{-6}$,Th/U 值为 0.43~0.60(>0.40),与典型岩浆成因锆石特征一致(Hoskin and Ireland, 2000)。锆石总稀土 $\Sigma \text{REE} = 435.71 \times 10^{-6} \sim 1597.33 \times 10^{-6}$ (附表 2),稀土元素配分曲线具有 LREE 相对亏损, HREE 陡立富集特征,且 Ce 正异常与 Eu 负异常显著($\delta\text{Eu} = 0.04 \sim 0.54$)(图 5c)。

3.2 岩石地球化学特征

3.2.1 主量元素

石英闪长玢岩 5 件岩石地球化学样品的分析数据见附表 3*。较低的烧失量值($\text{LOI} = 0.97\% \sim 1.10\%$),说明本次采集的岩石样品未发生强烈蚀变作用。 SiO_2 含量较高且变化范围较小,为 65.53%~65.76%,平均值为 65.65%; Al_2O_3 含量为 15.65%~15.87%,平均值为 15.74%;富钠($w(\text{Na}_2\text{O}) = 5.09\% \sim 5.23\%$)、富钾($w(\text{K}_2\text{O}) = 2.98\% \sim 3.19\%$), $w(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) = 1.60 \sim 1.71$;全碱含量较高($w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = 8.07\% \sim 8.30\%$);低镁($w(\text{MgO}) = 1.37\% \sim 1.40\%$),对应的 Mg# 值为 28.84~29.39;CaO 含量为 2.44%~2.74%,平均值为 2.55%; TiO_2 含量均为 0.50%; P_2O_5 含量为 0.27%~0.28%,平均值为 0.28%。

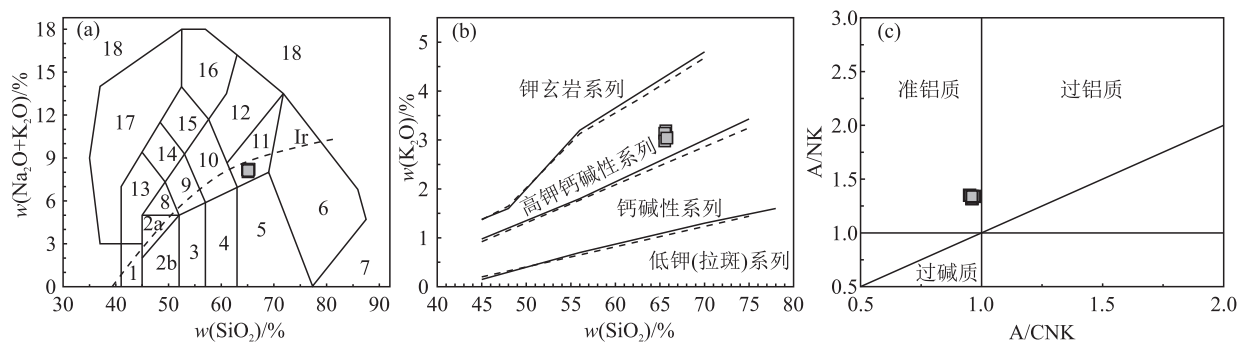
岩石碱度率 $\text{AR} = 2.55 \sim 2.69$,具偏碱性特征。 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ 图解中(图 6a),样品均属于亚碱性系列,成分投点落于石英二长岩范围。里特曼指数 $\sigma = 2.89 \sim 3.04$ (<3.3),显示钙碱性系列岩石特征;在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中(图 6b),样品点落在高钾钙碱性系列区域。铝饱和指数 $\text{A/CNK} = 0.95 \sim 0.97$ (<1), $\text{A/NK} = 1.32 \sim 1.35$ (>1),落于 $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ 图解的准铝质区域(图 6c)。

3.2.2 稀土和微量元素

石英闪长玢岩稀土总含量 $\Sigma \text{REE} = 95.25 \times 10^{-6} \sim 110.46 \times 10^{-6}$,平均值为 100.22×10^{-6} 。其中, LREE 含量为 $87.60 \times 10^{-6} \sim 101.83 \times 10^{-6}$, HREE 含量为 $7.65 \times 10^{-6} \sim 9.10 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE = 10.29~11.80,平均值为 11.04; $(\text{La}/\text{Yb})_N = 11.38 \sim 14.90$,平均值为 13.21; $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.35 \sim 4.39$,平均值为 3.88; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 2.06 \sim 2.22$,平均值为 2.12,表明岩石相对富集 LREE,轻、重稀土分馏明显,且 LREE 内部分馏程度大于 HREE。5 件样品的稀土元素配分曲线基本一致,均表现为 LREE 相对富集、HREE 相对亏损,无 Ce 异常且 Eu 正异常的右倾型曲线模式(图 7a); $\delta\text{Eu} = 1.27 \sim 1.37$,平均值为 1.31,暗示岩浆源区无斜长石残留。

在微量元素原始地幔标准化蜘蛛图中(图 7b),石英闪长玢岩各个样品的地球化学特征极为相似,总体显示富集 Rb、Ba、K、Pb、Sr 等大离子亲石元素(LILE)和 LREE,强烈亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE)和 HREE,与弧岩浆岩特征相一致。此外,岩石具有高 Sr($796 \times 10^{-6} \sim 951 \times 10^{-6}$)、低 Y($10.4 \times 10^{-6} \sim 12.3 \times 10^{-6}$)和低 Yb($1.03 \times 10^{-6} \sim 1.21 \times$

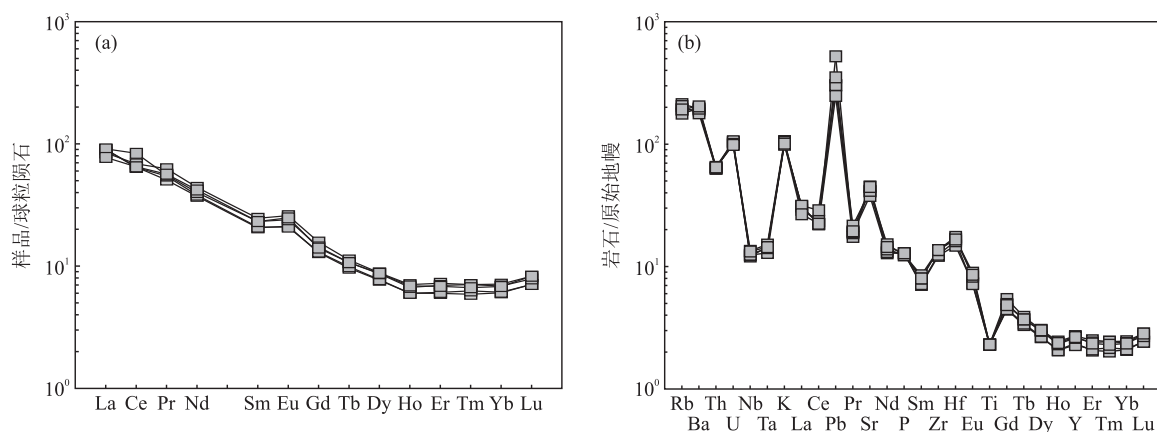
* 数据资料请联系编辑部获取或登录网址 https://cjytsdz.ijournals.cn/ch/reader/issue_browser.aspx



1. 橄榄辉长岩;2. 辉长岩;3. 辉长闪长岩;4. 闪长岩;5. 花岗闪长岩;6. 花岗岩;7. 硅英岩;8. 二长辉长岩;9. 二长闪长岩;10. 二长岩;11. 石英二长岩;12. 正长岩;13. 副长石辉长岩;14. 副长石二长闪长岩;15. 副长石二长正长岩;16. 副长正长岩;17. 副长深成岩;18. 霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

图6 石英闪长玢岩 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)- SiO_2 图解 (a, 据 Middlemost, 1994)、 K_2O - SiO_2 图解 (b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976; Middlemost, 1985) 和 A/NK - A/CNK 图解 (c, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 6 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)- SiO_2 (a, after Middlemost, 1994), K_2O - SiO_2 (b, after Peccerillo and Taylor, 1976; Middlemost, 1985) and A/NK - A/CNK (c, after Maniar and Piccoli, 1989) diagrams for quartz diorite porphyrite



(标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)

图7 石英闪长玢岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化蜘蛛图(b)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of quartz diorite porphyrite

10^{-6}) 含量, 相容元素 Cr ($10.9 \times 10^{-6} \sim 19.6 \times 10^{-6}$)、Ni ($4.28 \times 10^{-6} \sim 5.30 \times 10^{-6}$) 含量也较低。

4 讨论

4.1 成岩成矿时代

杨斜金矿区石英闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 3 颗捕获的岩浆锆石核部测点年龄分别为 947 ± 15 Ma、 696 ± 10 Ma 和 432 ± 6 Ma。其中, 前两者与北秦岭地体中秦岭岩群片麻岩岩浆锆石记录的新元古代 (950 ~ 850 Ma, 个别为 700 Ma 左右) 年龄相吻合 (杨力等, 2010); 后者则与笔者获取的杨斜片麻岩套 434 Ma 的锆石 U-Pb 年龄一致 (另文发表)。其余 13 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均

年龄为 149.5 ± 2.7 Ma, 代表了石英闪长玢岩的结晶年龄, 反映其侵位于晚侏罗世。

野外调查结果显示, 石英闪长玢岩与含金石英脉基本平行产出同一构造带, 但局部可见其被矿脉穿插或截切 (图 3g, i)。因此, 石英闪长玢岩的侵位年龄可限定本区金成矿时代的下限; 前人获取的含金黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 141 ± 18 Ma (余晓红, 2017), 两者在误差范围内基本一致, 表明杨斜金矿床的成岩成矿时代应为晚侏罗世—早白垩世。

年代学证据表明, 东秦岭存在晚侏罗世—早白垩世的构造—岩浆活动及金成矿峰值期。华北板块南缘小秦岭—熊耳山地区燕山期岩体主要形成

于 160 ~ 130 Ma(王义天等,2010;郭波等,2009;Mao et al., 2010;Li et al., 2012),与之相应的金成矿年龄峰值期为 135 ~ 120 Ma(表 1)。南秦岭柞水-山阳矿集区燕山期中酸性岩体的成岩年龄集中于 150 ~ 141 Ma(牛宝贵等,2006;谢桂青等,2012;吴发富等,2014;朱赖民等,2019;Zhang et al., 2021),金成矿时限多为 142 ~ 139 Ma(刘凯等,2019;丁坤,2020);南秦岭丁-马成矿带金成矿时代为 142 ~ 141 Ma(刘云华等,2016)。商丹断裂带杨斜金矿区的成岩成矿时代与南秦岭晚侏罗世—早白垩世的

岩浆-成矿时限相同,但早于华北板块南缘小秦岭-熊耳山地区,暗示其与前者可能处于同一成矿动力学背景。

4.2 岩石成因与岩浆源区

杨斜金矿区石英闪长玢岩属于高钾钙碱性准铝质系列岩石,具有如下特征:高 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ 、高 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ 、低 $\text{MgO} < 3\%$,相对富 Na 贫 K($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.60 \sim 1.71$);高 $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ 、低 $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$ 、贫 $\text{Sc} < 10 \times 10^{-6}$ ($4.69 \times 10^{-6} \sim 5.62 \times 10^{-6}$) 及高 $\text{Sr}/\text{Y} > 40$ ($70.57 \sim 88.88$);REE

表 1 东秦岭晚侏罗世—早白垩世金矿床成矿年龄

Table 1 Metallogenic ages of gold deposits in $\text{J}_3\text{-K}_1$ in East Qinling

成矿区带	矿床	测试对象	测试方法	成矿年龄/Ma	资料来源
华北板块南缘 小秦岭金矿田	红土岭 Q875	黑云母	Ar-Ar 等时线	128.3 ± 0.3	王义天等,2002
			Ar-Ar 坪年龄	128.5 ± 0.2	
		黑云母	Ar-Ar 等时线	126.9 ± 0.3	
			Ar-Ar 坪年龄	126.7 ± 0.2	
	东闯 507 号脉	绢云母	Ar-Ar 等时线	132.55 ± 2.56	徐启东等,1998
			Ar-Ar 坪年龄	132.16 ± 2.64	
		石英(Ⅰ阶段)	Ar-Ar 坪年龄	142.9 ± 2.9	
			Ar-Ar 等时线	132.6 ± 2.7	
	东闯	绢云母(Ⅱ阶段)	Ar-Ar 坪年龄	132.2 ± 2.6	Li et al., 2002
			Ar-Ar 坪年龄	128.3 ± 6.2	
		石英(Ⅲ阶段)	Ar-Ar 坪年龄	134.5 ± 0.7	
			Ar-Ar 坪年龄	123.7 ± 0.5	
	杨砦峪	绢云母	Ar-Ar 坪年龄	132.3 ± 0.5	Li et al., 2012
			Ar-Ar 坪年龄	124.3 ± 1.4	
		辉钼矿	Re-Os 等时线	128.8 ± 6.5	
			U-Th-Pb	120.9 ± 0.9	
	秦南	独居石	U-Th-Pb	122.6 ± 1.9	强山峰等,2013
			Re-Os 模式年龄	129.1 ± 1.6	
		辉钼矿	Re-Os 模式年龄	130.8 ± 1.5	
			Re-Os 等时线	129.5 ± 2.8	
华北板块南缘 熊耳山矿集区	祁雨沟	黄铁矿	Re-Os 等时线	127.5 ± 8.2	Qi et al., 2019
		黄铁矿	Rb-Sr 等时线	126 ± 11	Han et al., 2007
		辉钼矿	Re-Os 模式年龄	134.5 ± 0.6	
		辉钼矿	Re-Os 模式年龄	134.7 ± 0.6	Tang et al., 2013
	前河	绢云母	Ar-Ar 坪年龄	127.0 ± 1.6	
			Ar-Ar 坪年龄	123.8 ± 1.3	
		闪锌矿、黄铁矿、方铅矿	Rb-Sr 等时线	119.5 ± 1.8	
			Rb-Sr 等时线	141 ± 18	
商丹带	杨斜	黄铁矿	Re-Os 等时线	141 ± 18	余晓红,2017
南秦岭柞水- 山阳矿集区	夏家店	萤石、方解石	Sm-Nd 等时线	139.64 ± 0.98	刘凯等,2019
	龙头沟	石英、白云石、重晶石、黄铁矿	Sm-Nd 等时线	141.7 ± 0.92	丁坤,2020
南秦岭丁- 马成矿带	东沟-金龙山	绢云母	Ar-Ar 等时线	141.6 ± 2.8	刘云华等,2016
		绢云母	Ar-Ar 坪年龄	142.34 ± 0.83	

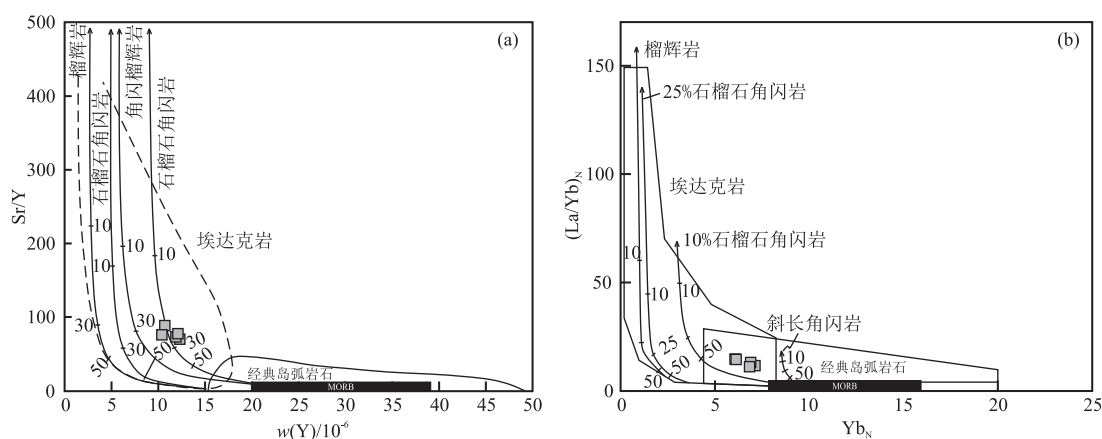


图8 石英闪长玢岩 Sr/Y-Y 图解(a, 据 Defant and Drummond, 1990)和 $(La/Yb)_N$ -Yb_N 图解(b, 据 Drummond and Defant, 1990)

Fig. 8 Sr/Y-Y (a, after Defant and Drummond, 1990) and $(La/Yb)_N$ -Yb_N (b, after Drummond and Defant, 1990) diagrams of quartz diorite porphyrite

强烈分异,富集 LREE 且亏损 Nb、Ta、Ti 等 HFSE 和 HREE,正 Sr 和 Eu 异常等,与典型埃达克岩地球化学特征相似(Defant and Drummond, 1990)。在 Sr/Y-Y 图解(图 8a)和 $(La/Yb)_N$ -Yb_N(图 8b)图解中,样品点基本落在埃达克岩区域。

典型埃达克岩多起源于俯冲洋壳板片的部分熔融(Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999)。而秦岭造山带在晚侏罗世已处于陆内构造演化阶段(Dong and Santosh, 2016),因此,本区石英闪长玢岩的形成不可能与俯冲洋壳板片的部分熔融有关,应属于埃达克质岩。目前,关于埃达克质岩的成因模式主要包括以下几种:①拆沉下地壳的部分熔融(Xu et al., 2002; Gao et al., 2004; Wang et al., 2006);②俯冲陆壳的部分熔融(Wang et al., 2008; 姜子琦等, 2011);③玄武质岩浆的同化混染与结晶分异作用(AFC)(Castillo et al., 1999);④高压分离结晶作用(HPFC)(Macpherson et al., 2006);⑤长英质和玄武质岩浆的混合(Guo et al., 2007; Streck et al., 2007; Qin et al., 2007);⑥增厚下地壳的部分熔融(张旗等, 2001; Chung et al., 2003; Hou et al., 2004; Wang et al., 2005; Ou et al., 2017)。

拆沉下地壳部分熔融是埃达克质岩的成因模式之一,主要发生于板内伸展环境(王强等, 2007),岩石一般表现出高 MgO (>1.5%) 含量或高 Mg# 值(>50),富 Cr、Ni 特征。晚侏罗世—早白垩世(J₃—K₁),整个秦岭造山带处于陆内造山的挤压环境(张国伟, 2019),非板内伸展背景;且本文石英闪长玢岩的低 MgO (1.37% ~ 1.40%) 含量、低 Mg# 值(28.84 ~ 29.39),贫 Cr (10.9×10^{-6} ~ 19.6×10^{-6})

和 Ni (4.28×10^{-6} ~ 5.30×10^{-6}),与上述成因机制存在显著差异,也不同于与俯冲陆壳部分熔融有关的高 MgO 埃达克质岩特征($w(\text{MgO}) = 1.41\% \sim 6.34\%$, $\text{Mg\#} = 46 \sim 69$, $w(\text{Cr}) = 25.7 \times 10^{-6} \sim 383 \times 10^{-6}$, $w(\text{Ni}) = 14.13 \times 10^{-6} \sim 183 \times 10^{-6}$)(Wang et al., 2008)。此外,石英闪长玢岩的低镁,贫铬、镍及矿物相中不含辉石的特征,也与长英质和玄武质岩浆混合成因的埃达克质岩存在明显差异(Guo et al., 2007; Streck et al., 2007)。

Castillo et al. (1999)对菲律宾 Camiguin 岛埃达克岩的研究表明,其在时空上与源于地幔楔的玄武质岩浆紧密关联,形成于玄武质岩浆的同化混染和低压条件下角闪石 + 斜长石的分离结晶,且 Al_2O_3 随 SiO_2 的增加而降低、Ba 随 SiO_2 的增加而增加。杨斜金矿区石英闪长玢岩不具有类似的元素演化趋势(图 9a, b);高 Sr 含量(796×10^{-6} ~ 951×10^{-6})及 Eu 正异常($\delta\text{Eu} = 1.27 \sim 1.37$),指示岩石未发生斜长石的分离结晶,且 $(La/Yb)_N$ -La 图解中样品点与部分熔融趋势近于一致(图 9F);研究区也暂未发现同期的玄武质岩浆活动,因此不可能形成于上述过程。石榴子石 ± 辉石高压分离结晶成因的埃达克质岩, SiO_2 变化范围较大,且与微量元素含量或比值存在特征关系,如 Dy/Yb 、 $(La/Yb)_N$ 和 Sr/Y 随 SiO_2 的增大而增大(Macpherson et al., 2006)。杨斜金矿区石英闪长玢岩 SiO_2 变化范围极小,也无相似的元素变化趋势(图 9c-e),可排除高压分离结晶作用(HPFC)成因模式。

杨斜金矿区石英闪长玢岩为高钾钙碱性系列岩石,富钾($w(\text{K}_2\text{O}) = 2.98\% \sim 3.19\%$),但仍为钠

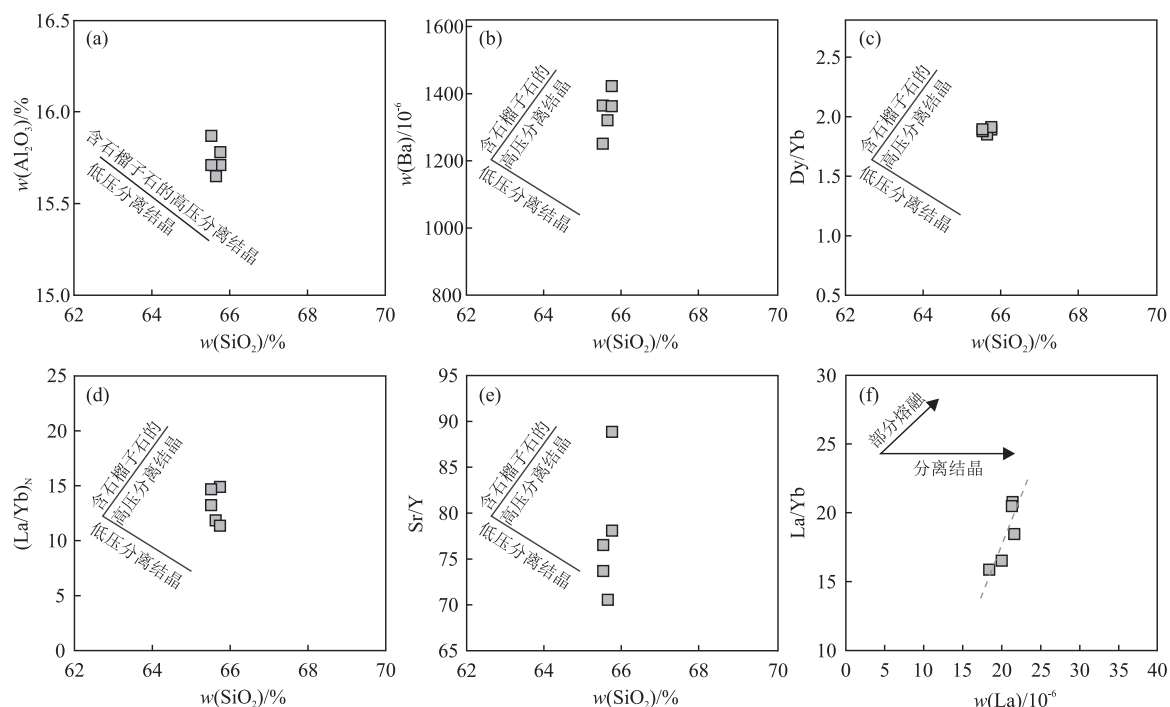


图9 石英闪长玢岩 Harker 图解(a~e, 演化趋势转引自姜子琪等, 2011) 和 (La/Yb)-La 图解(f)

Fig. 9 Harker (a~e, evolution curves after Jiang et al., 2011) and (La/Yb)-La (f) diagrams of quartz diorite porphyry

质($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.60 \sim 1.71$), 与中国东部燕山期 C 型埃达克岩地球化学特征相近(张旗等, 2001), 指示其可能形成于增厚镁铁质下地壳的部分熔融。在哈克变异图解中(图 10), 样品点也基本落于下地壳增厚范围内, 进一步说明其源于加厚下地壳物质的部分熔融。岩石的高 Sr 低 Yb、高 Sr/Y 比值及 Eu 正异常, 表明岩浆源区残留物主要为石榴石 ± 角闪石, 无斜长石; $\text{Y}/\text{Yb} = 10.00 \sim 10.43$ (接近于 10), $(\text{Ho}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.98 \sim 1.01$ (接近于 1), 且 HREE 存在轻微的抬头拖尾, 说明角闪石为主要的残留相。综上所述, 岩石源区残留相应为 10% 石榴石角闪岩(图 8b)。

4.3 构造环境及地质意义

杨斜金矿床含金矿脉与石英闪长玢岩脉空间上紧密伴生, 成岩成矿时代一致, 近矿围岩蚀变以钾化、硅化、黄铁矿化等中高温蚀变为主(马承等, 2021), 矿石金属矿物中含碲银矿、碲铅矿和碲金银矿等碲化物, 属于富 Au-Ag-Te 的热液系统(余晓红, 2017); 部分含金石英脉中存在钨矿化, 拣块基本分析 WO_3 品位达 $0.066\% \sim 0.265\%$; 流体包裹体研究显示, 成矿流体属于中温、低盐度的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 体系, 成矿流体主要为岩浆来源(待发表), 综合认为其为典型的岩浆期后热液型金矿床。

中晚三叠世($T_2\text{-}T_3$), 扬子、华北及其间的秦岭微板块沿勉略与商丹两缝合带双双向北发生陆-陆俯冲碰撞造山(张国伟等, 2019), 主要在华北板块南缘形成与俯冲碰撞造山作用有关的金钼成矿系统, 包括造山型金钼矿床(大湖金钼矿)和碳酸岩脉型钼矿床(黄龙铺钼矿)等(卢欣祥等, 2008; 陈衍景, 2010)。晚三叠世—早侏罗世($T_3\text{—}J_1$), 秦岭造山带转入陆内造山早期的伸展塌陷阶段(张国伟等, 2001), 在宁陕—镇安一带形成与后碰撞造山作用有关的钨钼金成矿系统, 例如岩浆热液型钼金矿床(新铺钼矿)和矽卡岩型钨钼矿床(月河坪钼矿、核桃坪钨矿)等(李双庆等, 2010; 代军治等, 2015; 代鸿章等, 2019)。晚侏罗世—早白垩世($J_3\text{—}K_1$), 区域处于陆内挤压向伸展转换或伸展的构造环境(Chen et al., 2000; Li et al., 2012), 东秦岭爆发巨量金多金属成矿与强烈岩浆活动, 不同构造单元存在不同的矿化类型: 华北板块南缘及北秦岭以造山型、岩浆热液型金钼和斑岩-矽卡岩型钼成矿(金堆城钼矿)系统为主(Mao et al., 2002; 李永峰等, 2005), 包括小秦岭-熊耳山地区在内的华北板块南缘金成矿作用, 与早白垩世华北克拉通岩石圈大规模减薄密切相关(Wu et al., 2005); 商丹断裂带为岩浆热液脉型钨金成矿系统(杨斜金矿); 而南秦

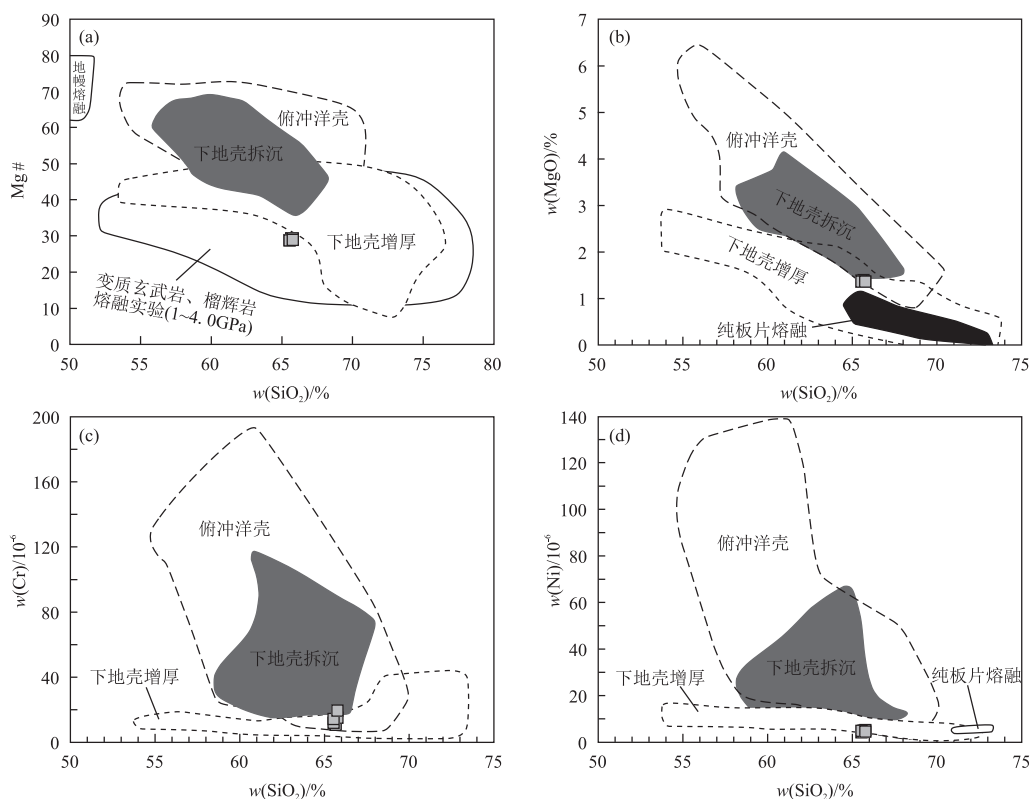


图 10 石英闪长玢岩 Harker 变异图解(据 Wang et al., 2006, 2011)

Fig. 10 Harker variation diagrams of quartz diorite porphyrite (after Wang et al., 2006, 2011)

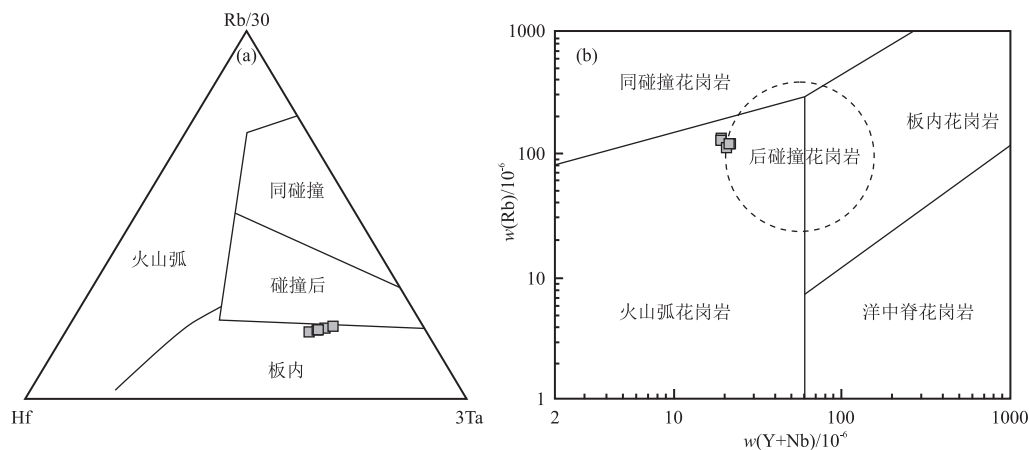


图 11 石英闪长玢岩 Rb/30-Hf-3Ta 图解(a, 据 Harris et al., 1986) 和 Rb-(Y+Nb) 图解(b, 据 Pearce, 1996)

Fig. 11 Rb/30-Hf-3Ta (a, after Harris et al., 1986) and Rb-(Y+Nb) (b, after Pearce, 1996) diagrams of quartz diorite porphyrite

岭则主要是斑岩-矽卡岩型钼(钨)-铜-金(冷水沟铜钼金矿、池沟铜矿)和卡林型金成矿系统(金龙山金矿)(陈雷等, 2014; 刘云华等, 2016; Zhang et al., 2020), 后者成矿年龄为 142 ~ 139 Ma (表 1), 对应于中国北方中生代构造体制大转折晚期(毛景文等, 2005), 不同的构造环境及动力学背景, 或是南秦岭金成矿时代早于华北板块南缘的重要原因。

杨斜金矿区石英闪长玢岩相对富集 LREE 和 LILE, 亏损 HREE 和 HFSE, 尤其是 Nb、Ta、Ti 强烈亏损, 显示弧岩浆岩地球化学特征。但其源于加厚下地壳部分熔融的埃达克质岩石属性和 149.5 ± 2.7 Ma 的成岩年龄, 指示研究区在晚侏罗世处于非弧环境; 在 Rb/30-Hf-3Ta 图解(图 11a) 和 Rb-(Y+Nb) 图解(图 11b) 中, 样品点也分别落于板内与后

碰撞花岗岩附近。结合成岩成矿时代与区域构造演化特征,认为杨斜金矿区石英闪长玢岩和金成矿作用均形成于秦岭造山带 J_3-K_1 陆内俯冲向伸展转换的构造环境。

5 结论

(1) 东秦岭杨斜金矿区石英闪长玢岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 149.5 ± 2.7 Ma (MSWD = 2.4, $n = 13$), 属于晚侏罗世岩浆活动的产物, 与金矿成矿时代基本一致。

(2) 石英闪长玢岩属于高钾钙碱性准铝质系列岩石, 相对富集 Rb、Ba、K、Pb、Sr 等 LILE 和 LREE, 亏损 Nb、Ta、Ti 等 HFSE 和 HREE。高 SiO_2 、 Al_2O_3 、Sr 及 Sr/Y, 低 Y、Yb 的特点, 与典型埃达克质岩特征一致, 成因机制为加厚下地壳的部分熔融。

(3) 杨斜金矿属岩浆期后热液型金矿床, 形成于秦岭造山带晚侏罗世—早白垩世陆内俯冲向伸展转换的构造环境。

致谢: 诚挚感谢西安矿产资源调查中心姚薇工程师在薄片鉴定过程中的指导。由衷感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见, 以及编辑部老师对文章的精心校稿! 在此, 特别祝贺中国地质调查局成都地质调查中心成立 60 周年!

参考文献 (References):

- Castillo P R, Janney P E, Solidum R U, 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33–51.
- Chen Y J, Li C, Zhang J, et al., 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type[J]. *Science in China (Series D)*, 43(Sup.): 82–94.
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, et al., 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. *Geology*, 31(11): 1021–1024.
- Defant M J, Drummond M S, 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347(6294): 662–665.
- Dong Y P, Santosh M, 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China [J], *Gondwana Research*, 29(1): 1–40.
- Drummond M S, Defant M J, 1990. A model for Trondhjemite-Tonalite-Dacite Genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. *Journal of Geophysical Research*, 95(B13): 21503–21521.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 432(7019): 892–897.
- Guo F, Nakamura E, Fan W M, et al., 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing; Yanji Area, NE China [J]. *Journal of Petrology*, 48(4): 661–692.
- Han Y G, Li X H, Zhang S H, et al., 2007. Single grain Rb-Sr dating of euhedral and cataclastic pyrite from the Qiyugou gold deposit in western Henan, central China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(13): 1820–1826.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G, 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [C]// Coward M P, Ries A C. *Collision Tectonics*. Geological Society, London, Special Publication, 67–81.
- Hoskin P W O, Ireland T R, 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator [J]. *Geology*, 28(7): 627–630.
- Hoskin P W O, Schaltegger U, 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62.
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al., 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1–2): 139–155.
- Hu F Y, Liu S W, Ducea M N, et al., 2017. The geochemical evolution of the granitoid rocks in the South Qinling Belt: Insights from the Dongjiangkou and Zhashui intrusions, central China [J]. *Lithos*, 278–281: 195–214.
- Li J W, Li Z K, Zhou M F, et al., 2012. The Early Cretaceous Yangzhaiyu lode gold deposit, North China Craton: A link between craton reactivation and gold veining [J]. *Economic Geology*, 107(1): 43–79.
- Li Q Z, Chen Y J, Zhong Z Q, et al., 2002. Ar-Ar dating on the metallogenesis of the Dongchuang gold deposit in the Xiaolinling area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 488–493.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al., 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.
- Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F, 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3): 581–593.
- Maniar P D, Piccoli P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Mao J W, Goldfarb R J, Zhang Z W, et al., 2002. Gold deposits in the Xiaolinling-Xiongershan region, Qinling Mountains, central China [J]. *Mineralium Deposita*, 37(3–4): 306–325.
- Mao J W, Xie G Q, Pirajno F, et al., 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern

- China; SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 57(1): 51–78.
- Martin H, 1999. Adakitic magmas; Modern analogues of Archaean granitoids[J]. Lithos, 46(3): 411–429.
- Meng Q R, Zhang G W, 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China[J]. Tectonophysics, 323(3): 183–196.
- Middlemost E A K, 1985. Magmas and Magmatic rocks[M]. London: Longman, 1–266.
- Middlemost E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 37(3–4): 215–224.
- Ou Q, Wang Q, Wyman D A, et al., 2017. Eocene adakitic porphyries in the central-northern Qiangtang Block, central Tibet: Partial melting of thickened lower crust and implications for initial surface uplifting of the plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(2): 1025–1053.
- Pearce J A, 1996. Source and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 19(4): 120–125.
- Peccherillo A, Taylor S R, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63–81.
- Qi N, Wang P, Yu J, et al., 2019. Geochronology and origin of the Qi189 porphyry gold deposit in Qiyugou orefield, Qinling orogen, China[J]. Ore Geology Reviews, 114: 103121.
- Qin J F, Lai S C, Wang J, et al., 2007. High-Mg# adakitic tonalite from the Xichahe area, south Qinling Orogenic Belt (central China): Petrogenesis and geological implications[J]. International Geology Review, 49(12): 1145–1158.
- Streck M J, Leeman W P, Chesley J, 2007. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt[J]. Geology, 35(4): 351–354.
- Sun S S, McDonough W E, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313–345.
- Tang K F, Li J W, Selby D, et al., 2013. Geology, mineralization, and geochronology of the Qianhe gold deposit, Xiong'er shan area, southern North China Craton[J]. Mineralium Deposita, 48(6): 729–747.
- Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L, 1997. Epithermal and porphyry deposits; The adakite connection[J]. Earth & Planetary Sciences, 325(2): 103–109.
- Tian Y F, Ye H S, Mao J W, et al., 2019. Geochronology and geochemistry of the Dianfang gold deposit, western Henan Province, central China: Implications for mineral exploration[J]. Ore Geology Reviews, 111: 102967.
- Wang Q, Li Z X, Chung S L, et al., 2011. Late Triassic high-Mg andesite/dacite suites from northern Hohxil, North Tibet: Geochronology, geochemical characteristics, petrogenetic processes and tectonic implications[J]. Lithos, 126(1–2): 54–67.
- Wang Q, McDermott F, Xu J F, et al., 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting[J]. Geology, 33(6): 465–468.
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al., 2008. Eocene melting of subducting continental crust and early uplifting of central Tibet: Evidence from central-western Qiangtang high-K calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 272(1–2): 158–171.
- Wang Q, Xu J F, Jian P, et al., 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, south China: Implications for genesis of porphyry copper mineralization[J]. Journal of Petrology, 47(1): 119–144.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al., 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 233(1–2): 103–119.
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, et al., 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. Geology, 30(12): 111–1114.
- Yan Z, Wang Z Q, Yan Q R, et al., 2006. Devonian sedimentary environments and provenance of the Qinling orogen: Constrains on Late Paleozoic southward accretionary tectonics of the North China Craton[J]. International Geology Review, 48(7): 585–618.
- Zhang G W, Meng Q R, Lai S C, 1995. Tectonics and structure of Qinling orogenic belt[J]. Science in China (Series B), 38(11): 1379–1394.
- Zhang Z Y, Wang Y H, Liu J J, et al., 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.
- Zhang Z Y, Wang Y H, Zhang F F, et al., 2021. Origin of high Ba-Sr granitoids at Chigou in central China and implications for Cu mineralization: Insights from whole-rock geochemistry, zircon U-Pb dating, Lu-Hf isotopes and molybdenite Re-Os systematics[J]. Ore Geology Reviews, 138: 104416.
- 陈雷,王宗起,闫臻,等,2014. 秦岭山阳-柞水矿集区 150~140 Ma 斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo-Fe(Au) 矿床成矿作用研究[J]. 岩石学报, 30(2): 415–436.
- 陈衍景, 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. 中国地质, 37(4): 854–865.
- 陈毓川,王平安,秦克令,等,1994. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列的划分及区域成矿规律探讨[J]. 矿床地质, 13(4): 289–298.
- 代鸿章,王登红,刘丽君,等,2019. 南秦岭镇安核桃花坪钨钼矿床成矿时代及成矿模式探讨[J]. 地质学报, 93(6): 1342–1358.
- 代军治,高菊生,钱壮志,等,2019. 小秦岭镰子沟金矿床辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 38(8): 1369–1377.
- 代军治,鱼康平,王瑞廷,等,2015. 南秦岭宁陕地区新铺钼矿地质特征、辉钼矿 Re-Os 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 31(1): 189–199.
- 丁坤, 2020. 南秦岭柞-山矿集区典型金矿床成矿作用与成矿动力学

- 背景[D]. 长安大学, 博士学位论文.
- 葛战林, 郑艳荣, 郝迪, 等, 2020. 东秦岭杨斜—丰北河成矿带杨屋场钨(金)矿床地质特征及成因探讨[J]. 西北地质, 53(3): 140–152.
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等, 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.
- 郭波, 朱赖民, 李霖, 等, 2009. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景[J]. 岩石学报, 25(2): 265–281.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等, 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼—钨同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 13(3): 221–230.
- 姜子琦, 王强, Wyman D A, 等, 2011. 西藏冈底斯南缘冲木达约 30 Ma 埃达克质侵入岩的成因: 向北俯冲的印度陆壳的熔融? [J]. 地球化学, 40(2): 126–146.
- 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 等, 2007. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼—钨定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 26(4): 417–424.
- 李诺, 陈衍景, 张辉, 等, 2007. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景[J]. 地学前缘, 14(5): 186–198.
- 李双庆, 杨晓勇, 屈文俊, 等, 2010. 南秦岭宁陕地区月河坪夕卡岩型钼矿 Re-Os 年龄和矿床学特征[J]. 岩石学报, 26(5): 1479–1486.
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 等, 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J]. 矿床地质, 24(3): 292–304.
- 刘军锋, 孙勇, 孙卫东, 2009. 秦岭拉鸡庙镁铁质岩体锆石 LA-ICP-MS 年代学研究[J]. 岩石学报, 25(2): 320–330.
- 刘凯, 王瑞廷, 樊忠平, 等, 2019. 秦岭造山带柞水—山阳矿集区夏家店金矿床成矿时代及其地质意义[J]. 矿床地质, 38(6): 1278–1296.
- 刘云华, 李真, 周肃, 等, 2016. 南秦岭东沟—金龙山金矿地质特征、成矿时代及其地质意义[J]. 地学前缘, 23(4): 81–93.
- 卢欣祥, 李明立, 王卫, 等, 2008. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6): 762–773.
- 马承, 葛战林, 郑艳荣, 等, 2021. 陕西商洛杨斜金矿床地质特征与控矿因素探讨[J]. 西北地质, 54(2): 137–148.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等, 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 169–188.
- 牛宝贵, 和政军, 任纪舜, 等, 2006. 秦岭地区陡岭—小茅岭隆起带西段几个岩体的 Shrimp 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质论评, 52(6): 826–835.
- 强山峰, 毕诗健, 邓晓东, 等, 2013. 豫西小秦岭地区秦南金矿床热液独居石 U-Th-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 38(1): 43–56.
- 陕西省地质调查院, 2017. 中国区域地质志·陕西志[M]. 北京: 地质出版社.
- 王强, 许继峰, 赵振华, 等, 2007. 中国埃达克岩或埃达克质岩及相关金属成矿作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 26(4): 336–349.
- 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 等, 2011. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. 岩石学报, 27(6): 1573–1593.
- 王义天, 毛景文, 卢欣祥, 等, 2002. 河南小秦岭金矿区 Q875 脉中深部矿化蚀变岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其意义[J]. 科学通报, 47(18): 1427–1431.
- 王义天, 叶会寿, 叶安旺, 等, 2010. 小秦岭文峪和娘娘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质科学, 45(1): 167–180.
- 吴发富, 王宗起, 闫臻, 等, 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.
- 谢桂青, 任涛, 李剑斌, 等, 2012. 陕西柞水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.
- 徐启东, 钟增球, 周汉文, 等, 1998. 豫西小秦岭金矿区的一组 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年数据[J]. 地质论评, 44(3): 323–327.
- 杨力, 陈福坤, 杨一增, 等, 2010. 丹凤地区秦岭岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄: 北秦岭地体中—新元古代岩浆作用和早古生代变质作用的记录[J]. 岩石学报, 26(5): 1589–1603.
- 姚书振, 丁振举, 周宗桂, 等, 2002. 秦岭造山带金属成矿系统[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 27(5): 599–604.
- 余晓红, 2017. 北秦岭杨斜金矿床成矿作用特征及矿床成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 硕士学位论文.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等, 2019. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 25(5): 746–768.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等, 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等, 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造—成矿意义[J]. 岩石学报, 17(2): 236–244.
- 赵东宏, 杨忠堂, 李宗会, 等, 2019. 秦岭成矿带成矿地质背景及优势矿产成矿规律[M]. 北京: 科学出版社.
- 朱赖民, 郑俊, 熊潇, 等, 2019. 南秦岭柞水—山阳矿集区园子街岩体岩石地球化学及成矿潜力探讨[J]. 地学前缘, 26(5): 189–205.