

西秦岭早子沟金矿中酸性侵入岩地球化学、 年代学特征及成矿地质体的确定

李康宁^{1,2}, 程志中³, 李鸿睿^{1,2}, 庞振山³, 贾儒雅³, 刘晓箫^{1,2}, 朱锐⁴

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局 第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省金属贵金属矿产资源勘查与综合利用工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037; 4. 甘肃省合作早子沟金矿有限责任公司, 甘肃 合作 747000)

摘要: 西秦岭早子沟金矿是与岩浆活动有关的特大型金矿床, 矿区中酸性侵入岩集中发育, 主要有闪长玢岩、黑云石英闪长玢岩、花岗斑岩、石英闪长岩 4 种岩石类型。岩石微量元素均表现出富集大离子亲石元素 Rb、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 的特征。稀土元素总量整体上黑云石英闪长玢岩>闪长玢岩>石英闪长岩, 闪长玢岩、黑云母石英闪长玢岩、花岗斑岩具有弱-中等的负铕异常 ($\delta\text{Eu}=0.60\sim0.89$), 深部石英闪长岩以不具 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.96\sim1.07$)、"Nb-Ta 谷" 较深明显区别于浅部脉岩。石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 230 Ma, 晚于浅部脉岩 10~20 Ma, 与蚀变矿物绢云母年龄基本一致, 推测金成矿可能始于 230 Ma, 主成矿期为 230~211 Ma, 深部石英闪长岩为早子沟金矿的成矿地质体。

关键词: 早子沟金矿; 成矿地质体; 石英闪长岩; 稀土元素; 锆石 U-Pb 年龄

中图分类号: P588.12; P618.51

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)02-0205-15

Geochemical and chronological characteristics of intermediate-acid intrusive rocks in Zaozigou gold deposit, Western Qinling, and the determination of metallogenic geological body

LI Kang-ning^{1,2}, CHENG Zhi-zhong³, LI Hong-rui^{1,2}, PANG Zhen-shan³, JIA Ru-ya³, LIU Xiao-xiao^{1,2}
and ZHU Rui⁴

(1. The Third Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou 730050, China; 2. Engineering Technology Research Center for Exploration and Comprehensive Utilization of Metal and Precious Metal Mineral Resources of Gansu Province, Lanzhou 730050, China; 3. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4. Gansu Hezuo Zaozigou Gold Mine Co., Ltd, Hezuo 747000, China)

Abstract: The Zaozigou gold deposit in the Western Qinling Mountains is a super-large gold deposit related to magmatic activity. The intermediate-acid intrusive rocks in the mining area are intensively developed, mainly including diorite porphyrite, biotite quartz diorite porphyrite, granite porphyry and quartz diorite. The trace elements in rocks

收稿日期: 2022-10-06; 接受日期: 2023-02-27; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0601506); 甘肃省地质勘查基金项目(202202-D01); 甘肃省科技计划(22YF7GA050); 甘肃省青年人才项目(2020RCXM152); 中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20216200001297); 甘肃省自然资源厅科技创新项目(202201)

作者简介: 李康宁(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期在野外一线从事矿产地质调查与找矿预测工作, E-mail: 379607468@qq.com; 通讯作者: 程志中(1969-), 男, 博士, 教授级高工, 长期从事勘查地球化学与矿产勘查预测工作, E-mail: chengzhizhong69@163.com。

are characterized by enrichment of large ion lithophile elements Rb and K, and depletion of high field strength elements Nb, Ta, P and Ti. On the whole, the total amount of rare earth elements in biotite quartz diorite porphyrite> diorite porphyrite>quartz diorite, diorite porphyrite, biotite quartz diorite porphyrite and granite porphyry have weak to medium negative europium anomaly ($\delta\text{Eu}=0.60\sim0.89$), deep quartz diorite has no Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.96\sim1.07$), and “Nb-Ta valley” is deeper and obviously different from shallow vein rock. The zircon U-Pb age of quartz diorite is 230 Ma, which is 10~20 Ma later than that of shallow vein rock, and is basically consistent with the age of altered mineral sericite. It is speculated that gold mineralization may begin at 230 Ma, and the main mineralization period is 230~211 Ma. The deep quartz diorite is the metallogenic geological body of Zaozigou gold deposit.

Key words: Zaozigou gold mine; metallogenic geological body; quartz diorite; rare earth element; zircon U-Pb age

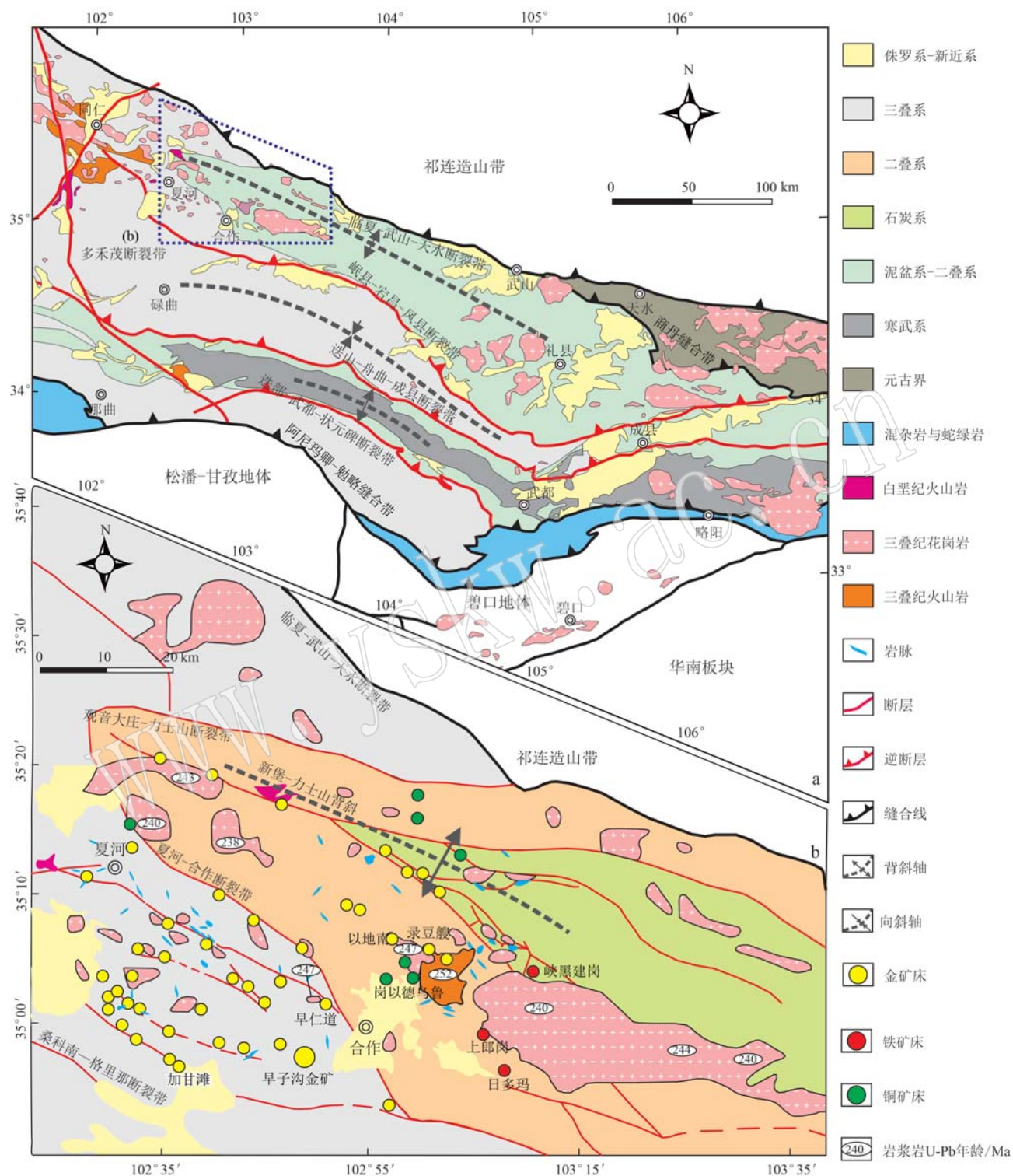
Fund support: National Key R & D Program (2017YFC0601506); Gansu Geological Exploration Fund Project (202202-D01); Science and Technology Program of Gansu Province (22YF7GA050); Gansu Province Youth Talent Project (2020RCXM152); The Central Government Guides Local Funds for Scientific and Technological Development (YDZX20216200001297); Gansu Provincial Department of Natural Resources Science and Technology Innovation Project (202201)

成矿地质体是与矿床形成在时间、空间和成因上具有密切联系的地质体,是作为矿床主成矿阶段成矿地质作用空间定位的实物载体,提供了矿床形成所需的主要能量和物质来源(叶天竺等, 2014)。成矿地质体研究是勘查区找矿预测理论和方法的重要研究内容之一,是找矿预测的基础和工程验证目标的主要参照物,一般矿床(体)分布与成矿地质体在空间上相依,时间上相同或相近。成矿地质体决定了矿床成因类型,确定成矿地质体,首先要准确划分矿床类型。作为西秦岭地区著名的金矿床之一,早子沟金矿矿床类型的认识经历了卡林型-类卡林型(微细粒浸染型)(刘春先等, 2011; 曹晓峰等, 2012; Liu *et al.*, 2015)、构造蚀变岩型(吕新彪等, 2009; 姜琪等, 2010; 陈耀宇等, 2012; 赵积珍等, 2013)、斑岩型(刘勇等, 2012)、造山型(Qiu *et al.*, 2020)、中低温岩浆热液型(Sui *et al.*, 2017, 2018; 李建威等, 2019)等不同认识,相对应的成矿地质体(或矿源层)有三叠纪地层(陈耀宇等, 2012; 曹晓峰等, 2012)、印支-燕山期岩浆岩(刘晓林, 2011; Sui *et al.*, 2018; 陈瑞莉等, 2018; 李康宁等, 2020)、大型变形构造等,但大多数人认为有岩浆作用或深部物质参与了成矿。早子沟金矿区多期中酸性脉岩密集发育,总体上与金矿体空间上相伴,但金矿受断裂控制明显,金矿体往往切穿岩体或地层,说明成矿作用明显晚于成岩作用,但到底是在固结后多长时间以后形成金矿化,或者与哪一期脉岩有关,还难以准确界定。2018~2020年,早子沟金矿区 83

线 2 660 m 中段(离地表约 600 m)实施了 2 000 m 科研深钻 SZ8314 工程,在埋深约 2 000 m 处发现了一层 20 m 宽且全岩金矿化的石英闪长岩,为研究成矿地质体、成矿时代、成矿地质背景等提供了良好的载体和条件。本次研究基于早子沟深部科研钻探情况,兼顾浅部中酸性脉岩,从岩石主量和微量元素特征、锆石 U-Pb 年代学等方面进行了对比研究,以确定成矿地质体,探讨成岩成矿特征,为研究区域地质构造演化和进一步找矿预测提供岩石学依据。

1 区域地质背景

西秦岭造山带位于青藏高原东北缘,属秦祁昆中央造山带中秦岭造山带的西延,南北夹持于祁连造山带和松潘-甘孜地体造山带之间,东边大致以宝成铁路沿线为界,西部以青海多禾茂断裂与昆仑造山带分界(图 1)。从元古宙开始,西秦岭造山带经历了“多洋(海)盆、多俯冲、多碰撞和多造山”的动力学作用过程(潘桂棠等, 1997; Yin *et al.*, 2004; 许志琴等, 2006),形成具有“多陆块、多岛弧”结构特征的复合型造山带(张国伟等, 2004; 许志琴等, 2006; 王宗起等, 2009; 杨经绥等, 2010)。研究区位于西秦岭造山带西北部,印支运动对区内的构造特征影响最大,近南北向的挤压造成了区内一系列近东西或北西西向的构造形迹(图 1)。研究区构造以褶皱为主,断裂次之,断裂方向多与褶皱轴向一致,断层多发育在褶皱翼部。断裂褶皱构造对

图1 研究区区域地质图(Qiu *et al.*, 2020)Fig. 1 Regional geological map of the study area (Qiu *et al.*, 2020)

区内的岩浆活动及矿点分布,具有十分重要的控制作用。力士山-围当山断裂带长度大于70 km,西段走向310°,向东呈帚状撒开为3条北倾逆断层,为石

炭系与二叠系的分界断层。夏河-合作断裂带为二叠系与三叠系的地层分界线,主要由达麦-合作、三岔沟-早仁道、扎油梁-枣子沟3条大的逆冲断层组

成,呈 NW-SE 向展布。3 条断层均为压性-压扭性逆冲断层,延长 30~50 km,呈舒缓波状展布。桑科南-格里那断裂带沿桑科南-加甘滩-格里那一线发育,呈 NW-SE 向展布,由索拉贡玛-纳合迪-格里那主断裂及其以南的两条断层组成,均为压扭性逆冲断层,断裂带延长 40~80 km。区内地层主要为三叠系,新堡-力士山背斜核部分布有晚古生代地层(泥盆系-石炭系、二叠系)。西秦岭地区岩浆活动强烈,可大致分为 4 个阶段:265~260、250~230、225~215(峰值 220 Ma)、210~200 Ma(峰值 205 Ma)(高婷,2011)。研究区侵入体主要分布在同仁-夏河-合作断裂以北,由江里沟花岗闪长岩、德合日二长花岗岩、三索玛花岗闪长岩、德乌鲁石英闪长岩-花岗闪长岩、美武花岗闪长岩等组成北西向岩浆弧。区内岩脉较为发育,主要有花岗闪长岩脉、石英闪长(玢)岩脉、花岗斑岩脉、闪长(玢)岩脉、石英脉等。岩脉展布方向可分为北西、北东、近东西向 3 组,以北西向居多。脉长几十米至几百米,宽几米至几十米。另外,早子沟金矿位于一个巨大的、长轴呈北西西向的椭圆形重力低异常区,在遥感影像上环形构造极为发育,表现为其中一个次级大环(子区),表明其深

部可能存在较大规模的隐伏岩体(王涛,2018)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质特征

矿区赋矿地层为早三叠世江里沟组(T_{1j}),岩性有泥硅质板岩、粉砂质板岩、钙质板岩、长石石英砂岩和少量灰色泥晶灰岩。岩石具有非常发育的条带状构造,条带主要成分为粉砂质、钙质(灰岩),条带中矿化蚀变较强。受岩浆侵入和断层影响,地层产状较为杂乱,但倾角普遍较陡。矿区地层总体呈单斜,走向近南北,倾向西,与区域地层总体北西走向不一致,形成穹状构造(图 2)。矿区不同方向的断裂构造十分发育,矿体和岩体的分布均受控于断裂构造。各类断裂相互交叉截切,显示出多期次活动的特点。断裂按走向不同,大致分为近东西向、近南北向、北东向、北西向及北北东向 5 组,矿区中心部位北东向、近南北向、北西向 3 组断裂为主要控矿断裂,它们分别控制着矿区北东向、近南北向、北西向矿带(梁志录等,2016;李康宁等,2019,2020)。矿区外围断裂呈环形分布,挟持了矿区范围,为矿区边

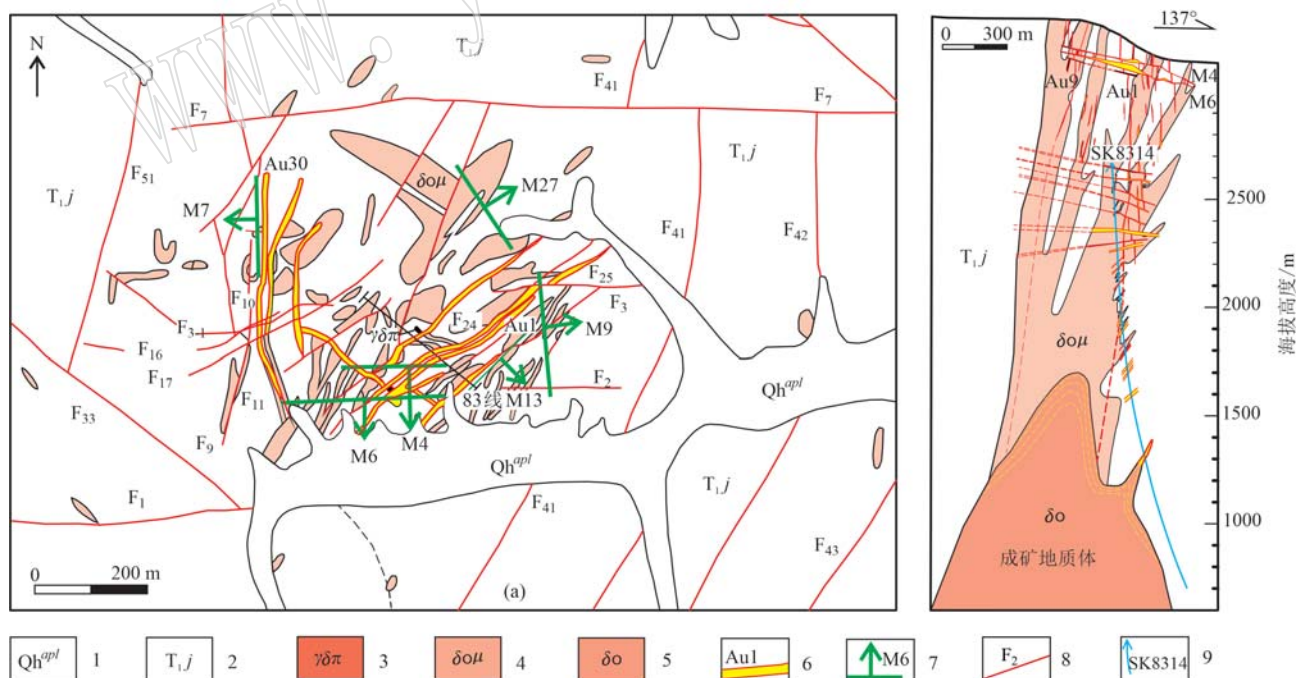


图 2 早子沟金矿地质简图(a)与 83 勘查线剖面图(b)

Fig. 2 Sketch geologic map(a) and No. 83 prospecting profile(b) of Zaozigou gold deposit

1—第四系; 2—早三叠世江里沟组; 3—花岗闪长斑岩; 4—石英闪长玢岩; 5—石英闪长岩; 6—金矿体及编号; 7—缓倾斜矿体投影及编号; 8—断裂及编号; 9—深部钻孔及编号

1—Quaternary; 2—Jiangligou Formation of Early Triassic; 3—granodiorite porphyry; 4—quartz diorite porphyry; 5—quartz diorite; 6—gold deposit and number; 7—projection and number of gently inclined ore body; 8—fault and number; 9—deep drilling and number

界断裂。

矿区中酸性侵入岩受断裂构造控制明显,总体呈北东向展布,西侧偏转为近南北向,少数为北西向。岩脉主要呈条带状,单体规模不大,由地表向深部逐渐变大,且相互贯通(李康宁等, 2019)。岩脉与围岩界线清晰、边界平整且延伸较长。岩性主要有闪长玢岩脉、石英闪长玢岩脉、黑云母石英闪长岩脉、花岗闪长岩脉、花岗斑岩脉等。根据野外观察到的相互穿切关系,侵入岩生成时序为:闪长玢岩(包体)→黑云石英闪长玢岩→花岗斑岩→细粒石英闪长岩(深部)。其中深部石英闪长岩为灰绿色,中细粒结构,块状构造,岩石由斜长石(60%)、钾长石(10%)、石英(15%)和黑云母(15%)等组成。斜长石呈板状、宽板状,粒径在0.2~1.0 mm之间,基本全部发生绢云母化和碳酸盐化,仅见蚀变残留体假像;石英、钾长石含量较少,呈他形粒状镶嵌在斜长石之间,粒径在0.1~0.3 mm之间,部分钾长石被碳酸盐交代;黑云母呈鳞片状,粒径在0.2~0.5 mm之间,强碳酸盐化、绿泥石化,具交代假像结构、交代残余结构(图3)。

2.2 矿体特征

早子沟金矿赋存于断裂破碎带或叠加于岩体内外接触带的断裂破碎带内及其旁侧的次级裂隙构造中。目前已圈定矿体523条,主矿体18条,根据矿化带的空间展布特点及组合样式可将矿区划分为东矿段和西矿段。东矿段为矿区最主要的矿化带,展布方向北东向,代表性矿体有Au1、Au9等。矿化带延长大于1 000 m,宽大于300 m,走向50°~60°,浅部倾向北西,倾角较陡,局部近于直立,深部被缓倾角断裂错断,倾向变为南东向。北东向矿脉蚀变矿化强,品位高,品位和厚度在走向和倾向上呈现出波状分布特征,在走向上有分支复合现象。西矿段主要矿化带展布方向为近南北向,代表性矿体有Au29、Au30、Au31等。矿化带延长大于1 000 m,宽大于500 m,走向350°~10°,倾向不一,倾角多大于75°,局部近直立,延伸稳定,主断面呈舒缓波状,陡倾角处矿体薄而贫,缓倾角处矿体厚且富。根据矿体倾角大小又可分为陡倾斜矿体与缓倾斜矿体。缓倾斜矿体倾向各个方向均有产出,倾向北东25°~50°的矿体有51个,东倾80°~90°的矿体有9个,南东至南倾140°~170°的矿体有19个,南西至西倾226°~250°的矿体有3个(可能大多尚未发现),总体的分布特征是北部矿体向北东方向倾,倾角在30°~

47°之间,东部矿体向东倾,倾角在10°~30°之间,西部矿体呈西倾,倾角在10°~30°之间,南部矿体呈南倾,倾角在10°~30°之间,整体分布趋势呈一个穹隆构造样式(图2)。在垂向上,有多层缓倾斜金矿体分布,缓倾与陡倾矿体交汇处矿体品位厚度明显增加。

3 采样与分析

本次系统采集了矿区的各种侵入岩样品,包括(石英)闪长玢岩、黑云石英闪长玢岩和花岗斑岩以及深部的石英闪长岩,系统分析了主量元素、微量元素和稀土元素,并对石英闪长岩中的锆石进行了U-Pb年龄测定。主量、稀土、微量元素测试由自然资源部兰州矿产资源监督检测中心完成,主量元素采用X射线荧光光谱法分析,仪器为RIX2100-X荧光光谱仪,FeO采用容量滴定法测定,分析误差<5%。微量元素测试采用等离子体质谱法分析,仪器为Agilent 7500a-等离子体质谱仪,分析误差5%~10%。

锆石阴极发光照相及U-Pb年代测试均由南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成,测试仪器为激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪。样品的同位素比值及元素含量计算采用GLITTER_ver 4.0程序,普通铅校正采用ComPbCorr#3.17校正程序(Ander sen, 2002),U-Pb谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算采用Isoplot/Exver3程序(Ludwig, 2003)完成。

4 主要侵入岩地球化学特征及年龄

4.1 主量元素

主量元素分析结果见表1。在TAS图解中(图4a),早子沟金矿的(石英)闪长玢岩、黑云石英闪长玢岩和石英闪长岩具有良好的一致性,均落入花岗闪长岩区域,花岗斑岩则偏向花岗岩区域。在K₂O-SiO₂图解(图4b)中,(石英)闪长玢岩、石英闪长岩偏向高钾钙碱性-钾玄岩系列,黑云母石英闪长玢岩为高钾钙碱性系列,花岗斑岩为钙碱性系列,从中性岩到基性岩,岩浆从高钾系列演化到低钾系列。在碱率图(图4c)中,所有岩石均具有钙碱性特征,在A/NK-A/CNK图解(图4d)中,早子沟金矿绝大部分脉岩为过铝质,这可能与样品处理或绢云母化有关。

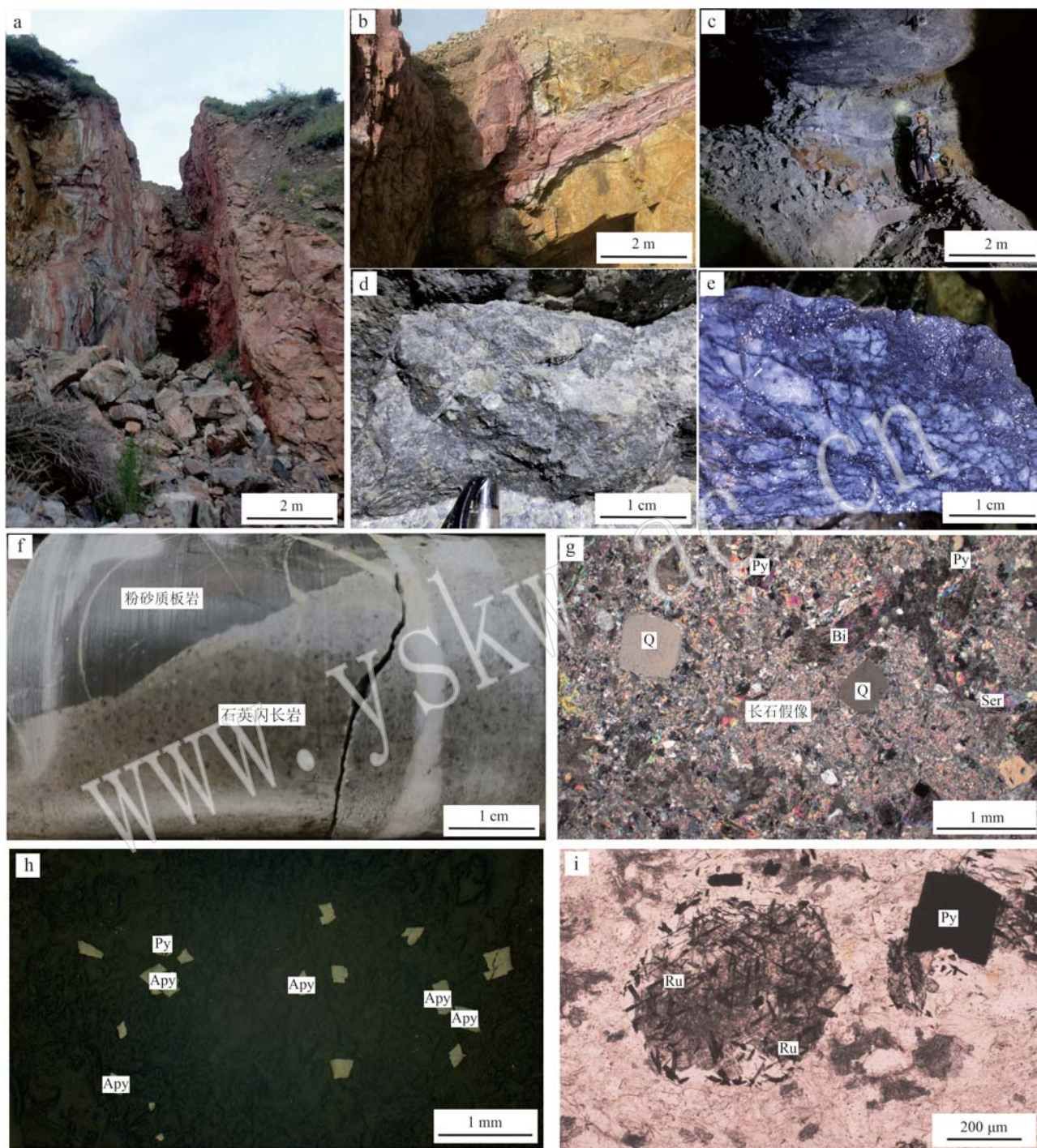


图3 早子沟金矿主要矿体照片

Fig. 3 Photos of main ore body from Zaozigou gold deposit

a—Au31 陡倾矿体; b—缓倾斜断裂切割 Au1; c—缓倾斜 M6 矿体; d—角砾岩型矿石; e—石英-辉锑矿石; f—深部石英闪长岩与围岩呈侵入接触; g—石英闪长岩中斜长石强绢云母化(正交偏光); h—石英闪长岩中发育毒砂化、黄铁矿化(反光); i—石英闪长岩中黑云母蚀变析出大量针状金红石(单偏光); Q—石英; Pl—斜长石; Bi—黑云母; Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Ru—金红石

a—Au31 steeply inclined ore body; b—gently inclined fracture cutting Au1; c—gently inclined M6 ore body; d—breccia-type ore; e—quartz-antimony ore; f—the deep quartz diorite is in intrusive contact with the surrounding rock; g—strong sericitization of plagioclase in quartz diorite (orthogonally polarized); h—arsenopyritization and pyritization are developed in quartz diorite (reflection); i—a large amount of needle-like rutile is precipitated from biotite alteration in quartz diorite (single polarized light); Q—quartz; Pl—plagioclase; Bi—biotite; Py—pyrite; Apy—arsenopyrite; Ru—rutile

表 1 早子沟金矿主要侵入岩主量元素 ($w_B/\%$)、微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果表Table 1 Analysis results of major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of main intrusive rocks from Zaozigou gold deposit

岩性	石英闪长玢岩					石英闪长岩				花岗斑岩		
样号	ZZG-5	ZZG-7	ZZG -9	SDZK 8314-1	ZZG-113	SDZK 8314-14	SDZK 8314-23	SDZK 8314-24	SDZK 8314-25	ZZG-24	ZZG3	ZZG02-3
SiO ₂	58.31	60.74	59.86	61.04	66.25	59.94	60.67	60.69	58.16	73.09	76.08	71.29
TiO ₂	0.77	0.57	0.63	0.67	0.61	0.57	0.60	0.59	0.60	0.59	0.16	0.61
Al ₂ O ₃	18.18	15.44	16.69	18.00	16.04	16.73	16.68	16.27	16.68	20.67	12.01	13.20
Fe ₂ O ₃	5.66	2.36	3.34	0.07	1.25	1.72	1.71	1.44	1.82	2.19	2.27	4.90
FeO	1.15	1.31	0.85	3.40	2.19	2.39	1.88	2.16	2.14	—	—	—
MnO	0.05	0.07	0.06	0.04	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.03	0.07	0.15
MgO	3.22	2.22	2.79	1.74	1.63	2.06	2.00	2.00	2.53	0.61	0.67	1.34
CaO	2.12	3.76	3.91	3.06	4.28	4.32	4.31	4.42	4.92	4.29	1.73	1.95
Na ₂ O	0.14	0.42	0.10	0.11	2.03	0.39	0.08	0.06	0.05	0.02	0.24	3.51
K ₂ O	5.41	4.69	3.83	0.76	3.20	4.00	4.36	4.24	4.42	1.09	3.08	1.28
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.03	0.14
LOI	3.92	4.92	5.92	6.92	—	8.48	9.48	10.48	6.20	—	—	—
Total	99.05	96.61	98.08	95.94	97.64	100.76	101.92	102.51	97.68	102.69	96.34	98.37
Rb	217.84	184.56	163.38	68.20	114.00	162.00	178.00	178.00	178.00	44.99	128.50	54.30
Ba	425.26	254.69	420.53	54.40	628.00	584.00	562.00	584.00	554.00	107.90	459.00	362.00
Th	11.35	13.81	10.50	15.40	21.40	14.30	14.40	14.90	15.60	12.29	27.70	12.20
U	3.79	3.00	4.89	4.13	3.18	4.34	4.28	4.71	4.21	5.27	4.41	2.05
Nb	9.18	10.66	9.55	13.20	10.60	7.02	5.82	7.02	6.42	9.61	18.90	10.20
Ta	0.69	0.82	0.76	1.95	0.82	0.99	0.52	0.64	0.56	0.84	1.60	0.80
Sr	191.41	136.62	193.65	163.00	301.00	200.00	230.00	204.00	228.00	88.21	105.50	347.00
Nd	26.43	30.43	24.36	27.60	31.80	26.20	29.00	25.10	27.80	25.71	33.10	24.50
Zr	142.08	166.07	148.97	201.00	174.00	144.00	134.00	122.00	120.00	266.24	200.00	200.00
Hf	3.89	4.50	3.94	6.00	3.10	6.20	4.60	3.90	4.65	7.74	6.30	5.50
Eu	1.05	1.09	0.91	0.85	1.52	1.51	1.42	1.18	1.20	0.94	0.41	0.96
La	32.67	37.63	28.27	34.00	38.80	31.60	45.50	33.70	29.90	34.80	29.70	34.10
Ce	64.16	74.21	56.48	64.10	86.30	65.36	86.30	61.80	63.60	67.80	56.80	65.80
Pr	7.12	8.27	6.42	7.46	9.32	7.45	9.59	7.02	7.17	7.87	6.78	7.62
Nd	26.43	30.43	24.36	27.60	31.80	25.71	33.10	24.50	26.20	29.00	25.10	27.80
Sm	4.76	5.60	4.67	4.67	6.04	5.46	6.98	4.77	5.17	4.81	3.94	4.34
Eu	1.05	1.09	0.91	0.85	1.52	0.94	0.41	0.96	1.51	1.42	1.18	1.20
Gd	3.62	4.06	3.68	3.57	4.60	3.76	5.23	3.68	4.21	3.04	2.54	2.66
Tb	0.49	0.53	0.51	0.42	0.56	0.44	0.88	0.58	0.56	0.45	0.36	0.41
Dy	2.45	2.52	2.45	2.12	2.69	1.77	4.95	3.25	2.64	2.37	1.84	1.97
Ho	0.41	0.43	0.41	0.37	0.43	0.28	1.07	0.69	0.40	0.39	0.28	0.32
Er	1.07	1.08	0.99	1.00	1.16	0.65	3.08	1.95	1.27	1.01	0.79	0.89
Tm	0.15	0.14	0.13	0.13	0.13	0.09	0.46	0.29	0.15	0.12	0.10	0.10
Yb	0.87	0.87	0.78	0.82	0.80	0.55	3.07	1.92	0.99	0.78	0.58	0.66
Lu	0.13	0.12	0.11	0.12	0.11	0.08	0.49	0.33	0.14	0.11	0.09	0.10
Y	12.12	12.41	11.47	7.77	9.10	7.39	28.50	19.10	10.40	8.28	6.35	6.65
ΣREE	145.37	166.98	130.18	147.23	184.26	144.14	201.11	145.44	143.91	153.97	130.07	147.97
LREE	136.18	157.23	121.12	138.68	173.78	136.52	181.88	132.75	133.55	145.70	123.50	140.86
HREE	9.18	9.76	9.06	8.55	10.48	7.62	19.23	12.69	10.36	8.27	6.57	7.11
LREE/HREE	14.83	16.11	13.37	16.22	16.58	17.92	9.46	10.46	12.89	17.62	18.79	19.83
(La/Yb) _N	26.84	31.08	25.98	29.74	34.79	41.21	10.63	12.59	21.66	32.00	36.73	37.06
δEu	0.74	0.67	0.65	0.61	0.85	0.60	0.20	0.67	0.96	1.06	1.07	1.00
δCe	0.99	0.99	0.99	0.94	1.08	1.01	0.96	0.93	1.03	0.96	0.94	0.96

续表 1

Continued Table 1

岩性	黑云石英闪长玢岩										
样号	ZZG-114	SDZK 8314-2	SDZK 8314-3	SDZK 8314-4	SDZK 8314 -5	SDZK 8314 -6	SDZK 8314 -7	SDZK 8314 -8	SDZK 8314 -9	SDZK 8314 -10	SDZK 8314 -11
SiO ₂	63.42	63.69	64.58	66.74	60.98	63.05	63.90	63.45	61.09	64.54	64.26
TiO ₂	0.60	0.60	0.54	0.56	0.57	0.56	0.55	0.58	0.56	0.55	0.60
Al ₂ O ₃	16.06	16.63	16.28	15.65	14.91	15.80	15.62	16.34	15.76	16.20	15.49
Fe ₂ O ₃	1.37	0.75	0.97	0.70	0.76	0.92	1.00	0.78	0.56	0.94	1.40
FeO	3.19	3.61	2.84	2.52	2.84	3.16	2.78	3.02	3.02	2.70	1.99
MnO	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05
MgO	3.92	2.57	2.27	1.97	1.77	2.06	2.04	2.25	1.76	2.03	1.47
CaO	4.80	5.22	4.78	4.34	5.29	5.27	4.53	3.74	6.12	4.60	4.36
Na ₂ O	1.78	1.86	1.82	1.78	1.69	1.82	1.75	1.29	1.68	1.98	1.81
K ₂ O	2.67	2.78	2.89	3.00	2.28	2.78	3.03	3.11	2.83	3.00	2.75
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10
LOI	—	3.40	3.45	0.50	5.87	3.58	3.48	4.48	5.48	3.48	7.48
Total	97.98	101.27	100.58	97.91	97.11	99.16	98.83	99.20	99.01	100.17	101.75
Rb	124.00	127.00	132.00	134.00	111.00	136.00	138.00	143.00	122.00	134.00	127.00
Ba	527.00	539.00	580.00	558.00	330.00	613.00	548.00	587.00	514.00	587.00	578.00
Th	18.00	12.60	14.00	15.10	12.20	11.70	13.00	14.40	11.20	12.40	12.60
U	3.72	4.27	4.32	4.31	3.38	3.83	3.82	4.36	3.87	3.83	3.56
Nb	9.55	11.40	11.30	11.80	10.40	10.90	10.30	12.40	9.86	9.90	10.90
Ta	0.73	1.31	1.15	1.07	0.82	0.99	0.88	1.09	0.77	0.82	0.89
Sr	292.00	368.00	351.00	344.00	384.00	331.00	361.00	308.00	344.00	464.00	331.00
Nd	26.70	27.30	28.00	33.90	29.00	28.80	38.50	26.60	28.50	29.20	31.80
Zr	149.00	176.00	168.00	192.00	180.00	168.00	173.00	173.00	173.00	188.00	201.00
Hf	2.00	3.90	4.00	5.00	4.65	4.20	4.00	4.90	3.90	4.45	5.00
Eu	1.48	1.11	1.09	1.20	1.09	1.15	1.27	1.07	1.21	1.09	1.19
La	30.50	32.90	34.50	40.90	36.00	34.60	49.40	32.30	32.90	37.00	38.50
Ce	62.20	61.40	65.30	77.10	67.00	63.10	79.70	57.00	62.00	69.00	73.10
Pr	7.65	7.26	7.64	9.08	7.88	7.81	10.60	7.25	7.54	8.03	8.59
Nd	26.70	27.30	28.00	33.90	29.00	28.80	38.50	26.60	28.50	29.20	31.80
Sm	5.45	4.86	4.87	5.79	4.94	5.06	6.47	4.71	5.09	5.00	5.61
Eu	1.48	1.11	1.09	1.20	1.09	1.15	1.27	1.07	1.21	1.09	1.19
Gd	4.50	4.32	4.17	4.64	3.98	4.54	5.50	4.05	4.45	4.08	5.11
Tb	0.61	0.57	0.53	0.57	0.48	0.58	0.70	0.50	0.55	0.50	0.71
Dy	3.51	3.16	2.84	2.79	2.40	3.26	3.87	2.64	2.91	2.59	4.40
Ho	0.64	0.57	0.51	0.45	0.40	0.57	0.68	0.46	0.49	0.44	0.85
Er	1.85	1.60	1.41	1.12	1.10	1.56	1.97	1.31	1.31	1.22	2.44
Tm	0.25	0.21	0.18	0.13	0.14	0.20	0.26	0.17	0.16	0.15	0.33
Yb	1.65	1.36	1.15	0.79	0.87	1.27	1.64	1.09	1.03	0.98	2.10
Lu	0.25	0.19	0.17	0.11	0.12	0.18	0.23	0.16	0.15	0.14	0.30
Y	13.70	12.70	10.90	8.74	9.28	12.50	15.40	10.20	11.10	9.65	21.20
ΣREE	147.24	146.81	152.36	178.57	155.40	152.68	200.79	139.31	148.29	159.42	175.03
LREE	133.98	134.83	141.40	167.97	145.91	140.52	185.94	128.93	137.24	149.32	158.79
HREE	13.26	11.98	10.96	10.60	9.49	12.16	14.85	10.38	11.05	10.10	16.24
LREE/HREE	10.10	11.25	12.90	15.85	15.38	11.56	12.52	12.42	12.42	14.78	9.78
(La/Yb) _N	13.26	17.35	21.52	37.14	29.68	19.54	21.61	21.26	22.91	27.08	13.15
δEu	0.89	0.73	0.72	0.68	0.73	0.72	0.63	0.73	0.76	0.72	0.67
δCe	0.97	0.93	0.94	0.94	0.93	0.90	0.81	0.88	0.93	0.94	0.94

—表示未达检测限。

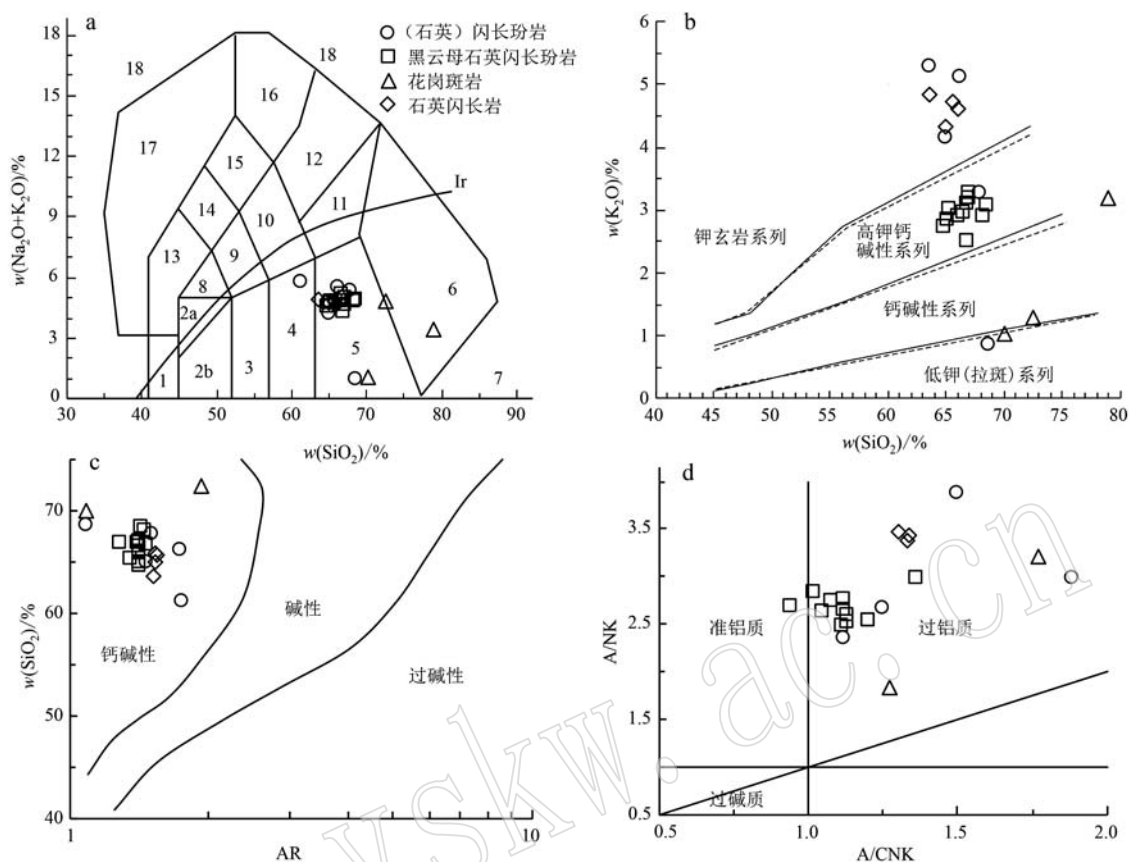


图4 早子沟金矿主要侵入岩分类图解

Fig. 4 Classification diagrams of main intrusive rocks in Zaozigou gold deposit

a— $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ 图解 (Middlemost, 1994): 1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—花岗岩; 7—石英岩; 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; b— $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (Pecerillo and Taylor, 1976); c— SiO_2-AR 图解 (Wright, 1969); d— $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ 图解 (Maniar and Piccoli, 1989)

a— $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ diagram (Middlemost, 1994): 1—olivine gabbro; 2a—alkaline gabbro; 2b—subalkaline gabbro; 3—gabbro-diorite; 4—diorite; 5—granodiorite; 6—granite; 7—silicate; 8—monzogabbro; 9—monzodiorite; 10—monzonite; 11—quartz monzonite; 12—syenite; 13—feldspathoid gabbro; 14—feldspathoid monzodiorite; 15—feldspathoid monzosyenite; 16—feldspathoid syenite; 17—foioldite; 18—aeirine sodalite/nepheline/coarse leucite; b— $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram (Pecerillo and Taylor, 1976); c— SiO_2-AR diagram (Wright, 1969); d— $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ diagram (Maniar and Piccoli, 1989)

4.2 稀土、微量元素

稀土、微量元素对比结果显示,4类侵入岩的 ΣREE 变化不大,变化范围为 $130.07\times 10^{-6}\sim 201.11\times 10^{-6}$,平均 156.37×10^{-6} ,低于世界花岗质岩石的稀土元素平均含量 290×10^{-6} (Taylor and McLennan, 1985)。LREE值为 $121.12\times 10^{-6}\sim 185.94\times 10^{-6}$,平均 145.50×10^{-6} ;HREE值为 $6.57\times 10^{-6}\sim 19.23\times 10^{-6}$,平均 10.87×10^{-6} ;LREE/HREE值为 $9.46\sim 19.83$,平均为14.05,具有明显的轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的特点。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 $10.63\sim 41.21$,平均为25.43,侵入岩的轻稀土元素

与重稀土元素之间分馏程度较高。

在稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图5)中,4种侵入岩的稀土元素配分曲线均为右倾型式,稀土元素总量整体上黑云石英闪长玢岩>闪长玢岩>石英闪长岩,花岗斑岩变化较大。闪长玢岩、黑云母石英闪长玢岩、花岗斑岩具有弱-中等的负铕异常($\delta\text{Eu}=0.60\sim 0.89$),石英闪长岩则基本不具铕异常($\delta\text{Eu}=0.96\sim 1.07$)。整体来看,石英闪长玢岩、石英黑云闪长玢岩和花岗斑岩均具有富集轻稀土元素而亏损重稀土元素的特征,且均具有弱Eu负异常,总体上具有良好的一致性,而石英闪长岩则以无铕

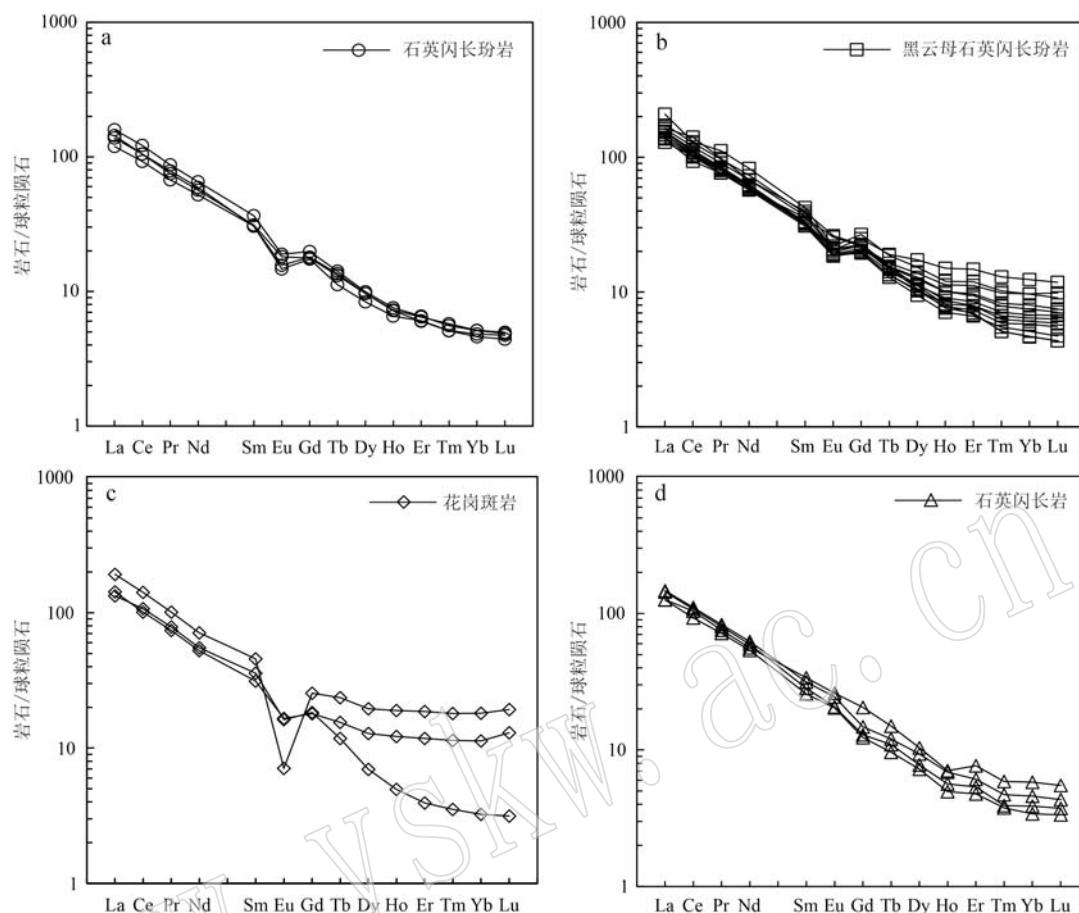


图5 早子沟金矿主要侵入岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(标准化数据据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of the main intrusive rocks in Zaozigou gold deposit (normalized data after Sun and McDonough, 1989)

异常明显区别于上述3类脉岩。

4种侵入岩的微量元素原始地幔标准化蛛网图(图6)具有相似性,均具有富集大离子亲石元素(LILE)Rb、K,亏损高场强元素(HFS)Nb、Ta、P、Ti的特征,反映其具一定的亲缘关系。不同的是闪长玢岩、花岗斑岩具有Sr负异常,黑云母石英闪长玢岩为Sr正异常,而石英闪长岩不具Sr异常。4种脉岩均具有“Nb-Ta谷”,石英闪长岩“Nb-Ta谷”明显较深,更靠近岛弧成因,较少受地壳混染。

4.3 主要侵入岩年龄

本次对深部石英闪长岩锆石U-Pb年龄进行了测定,阴极发光照片见图7,锆石U-Pb测年数据见表2,获得石英闪长岩加权年龄为 230.56 ± 0.96 Ma(图8)。王涛(2018)获得早子沟矿区的石英闪长玢岩、黑云石英闪长玢岩、花岗斑岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分别为 241.4 ± 2.0 、 241.2 ± 2.3 和 238.9 ± 1.6 Ma,这些脉岩年龄极为相近,变化范围极小,说明

它们侵位近于同时,而石英闪长岩则明显形成较晚。

5 讨论

由于金矿成矿年龄难以直接测定,只能依靠其赋存的地质体、特征矿物、标志性围岩蚀变等加以限制,来推断其形成时间。叶天竺等(2017)获得的早子沟金矿中石英流体包裹体Rb-Sr年龄为 249 ± 2 Ma;隋吉祥等(2013)获得的蚀变板岩型矿石中绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 219.4 ± 1.1 Ma,蚀变脉岩型矿石中绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 230 ± 2.3 Ma;Qiu等(2020)测出石英斑晶中岩浆独居石结晶年龄为 238.3 ± 2.6 Ma,与硫化物、绢云母伴生的热液独居石 ^{207}Pb 校正 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 211.1 ± 3.0 Ma,据此可大致判断金成矿年龄为230~211 Ma。前人对早子沟金矿浅部脉岩进行了大量测定,除刘勇等(2012)获得闪长岩脉年龄较小外,其余脉岩的锆石U-Pb年龄集中在249~

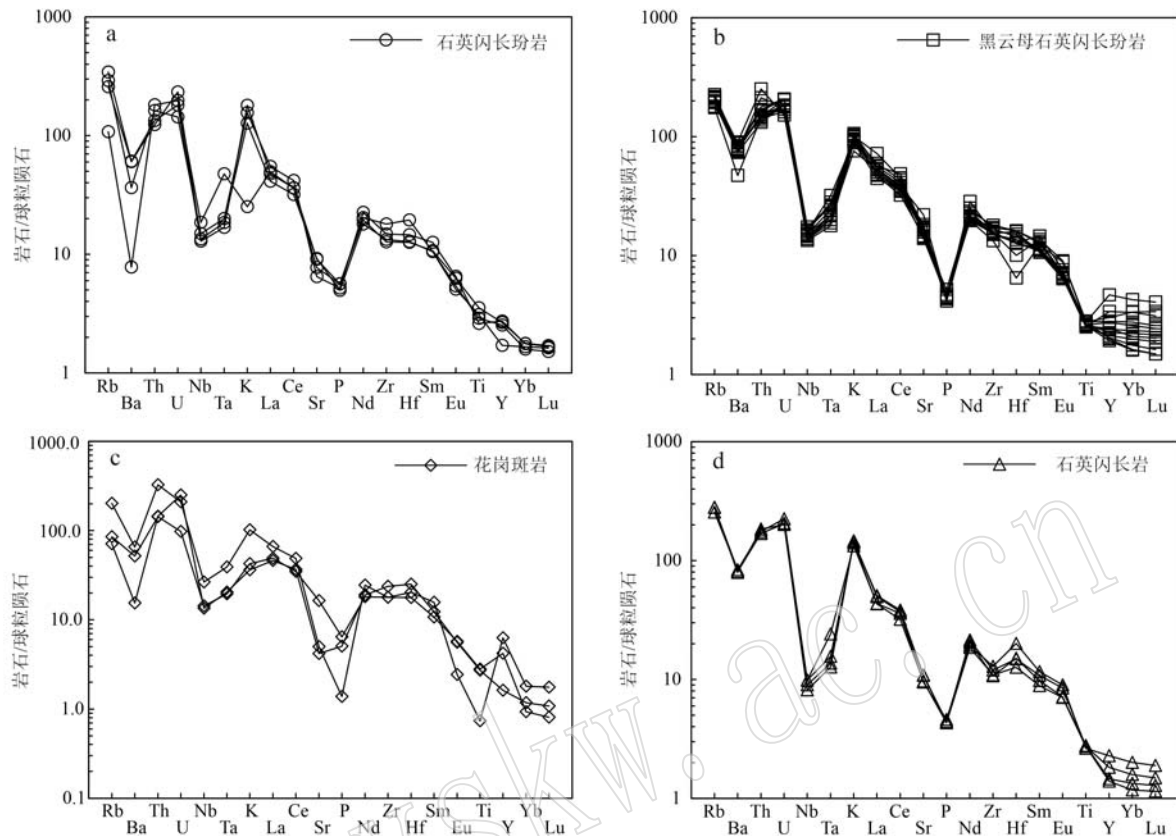


图6 早子沟金矿主要侵入岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化数据据 Sun 和 McDonough, 1989)
Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element diagrams of the main intrusive rocks in Zaozigou gold deposit
(normalized data after Sun and McDonough, 1989)

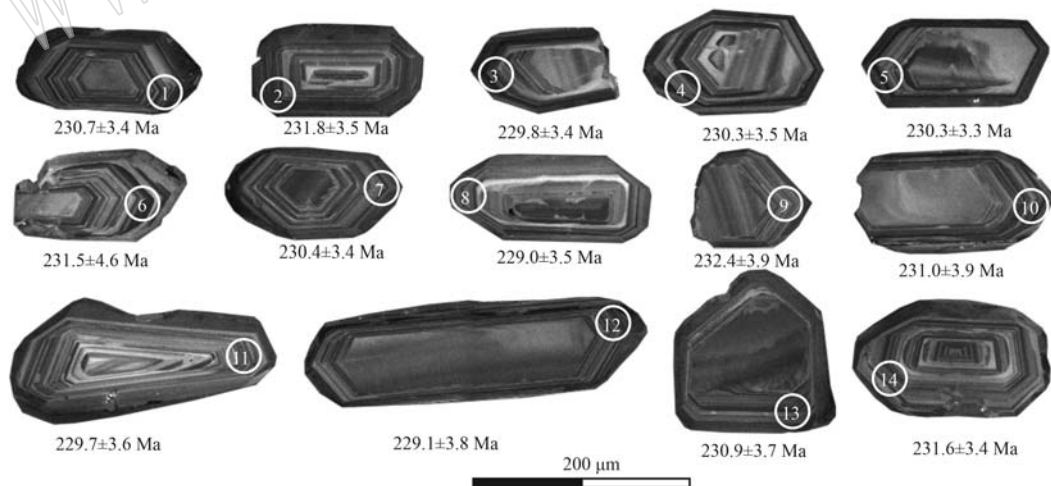


图7 早子沟金矿石英闪长岩锆石阴极发光图像及打点位置
Fig. 7 Cathodoluminescence (CL) images and dotting positions of zircons in quartz diorite from Zaozigou gold deposit

235 Ma(金维浚等, 2005; 隋吉祥等, 2013; 第鹏飞, 2018), 为印支早期, 且不同岩性的时代极为接近; 刘勇等(2012)对与成矿有关的2个闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测试, 结果分别为 215.5 ± 2.1 Ma

和 216.6 ± 2.4 Ma, 这两个年龄在误差范围内一致, 是目前早子沟闪长玢岩中获得的最年轻的年龄, 但是该年龄主要是从具有较低 Th/U 值的锆石边部获得, 可能代表的是锆石变质增生的年龄。早子沟金

表 2 早子沟金矿石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄数据
Table 2 Zircon U-Pb age data of quartz diorite from Zaozigou gold deposit

样品编号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ
TW-6-1	38.3	183.2	1 032.0	0.18	0.258 1	0.007 0	0.036 4	0.000 6	0.051 4	0.001 4	233.3	5.5	230.7	3.4
TW-6-2	35.6	146.9	889.0	0.17	0.257 5	0.007 2	0.036 6	0.000 6	0.051 2	0.001 4	232.4	5.8	231.8	3.5
TW-6-3	36.8	185.7	925.0	0.20	0.257 5	0.007 6	0.036 3	0.000 5	0.051 6	0.001 5	232.3	6.2	229.8	3.4
TW-6-4	35.5	176.8	894.0	0.20	0.257 1	0.007 0	0.036 4	0.000 6	0.051 6	0.001 4	233.0	5.6	230.3	3.5
TW-6-5	43.2	202.3	1 097.0	0.18	0.256 0	0.006 8	0.036 4	0.000 5	0.051 2	0.001 3	231.2	5.5	230.3	3.3
TW-6-6	28.2	132.6	754.0	0.18	0.255 0	0.009 9	0.036 6	0.000 7	0.050 9	0.001 9	230.4	8.0	231.5	4.6
TW-6-7	34.2	145.5	869.0	0.17	0.256 4	0.007 2	0.036 4	0.000 5	0.051 1	0.001 4	231.5	5.8	230.4	3.4
TW-6-8	28.7	108.3	730.0	0.15	0.253 5	0.007 7	0.036 2	0.000 6	0.051 3	0.001 5	229.0	6.3	229.0	3.5
TW-6-9	38.1	192.2	959.0	0.20	0.258 7	0.007 1	0.036 7	0.000 6	0.051 3	0.001 4	233.3	5.7	232.4	3.9
TW-6-10	33.9	108.5	893.0	0.12	0.257 7	0.008 9	0.036 5	0.000 6	0.051 5	0.001 8	232.5	7.2	231.0	3.9
TW-6-11	29.6	123.1	751.0	0.16	0.255 3	0.008 3	0.036 3	0.000 6	0.051 1	0.001 6	230.6	6.7	229.7	3.6
TW-6-12	30.7	136.3	815.0	0.17	0.257 4	0.008 5	0.036 2	0.000 6	0.051 9	0.001 6	233.2	7.2	229.1	3.8
TW-6-13	27.0	146.1	681.0	0.21	0.255 8	0.008 1	0.036 5	0.000 6	0.051 2	0.001 6	230.8	6.5	230.9	3.7
TW-6-14	34.9	153.8	898.0	0.17	0.257 7	0.007 0	0.036 6	0.000 6	0.051 3	0.001 4	232.6	5.7	231.6	3.4

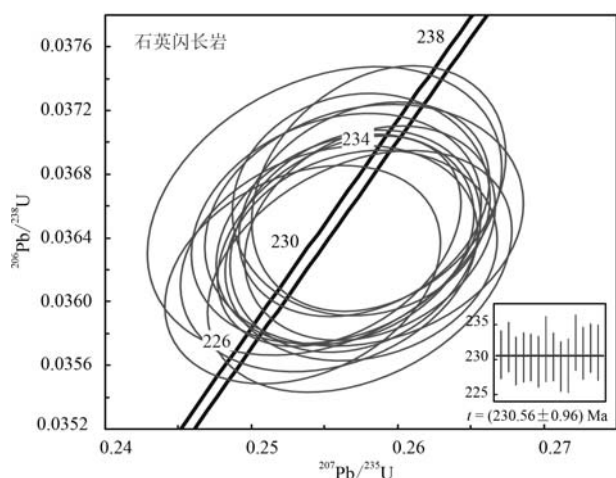


图8 早子沟金矿石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄特征

Fig. 8 Zircon U-Pb age characteristics of quartz diorite from Zaozigou gold deposit

矿浅部脉岩(石英闪长玢岩、黑云母石英闪长玢岩、花岗斑岩)的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄集中在 249~236 Ma(王涛, 2018), 本次获得深部成矿地质体石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 230.56 ± 0.96 Ma, 说明早子沟金矿区存在 2 期较大规模的岩浆活动, 可与西秦岭地区第 2 期、第 3 期岩浆活动相对应。叶天竺等(2017)研究认为大多数侵入体在地表出露的矿区, 其岩浆活动与金成矿作用具有同步性, 金成矿时代一般晚于侵入岩成岩 5~10 Ma; 而浅部仅仅见到中酸性岩脉的矿区, 岩脉和金成矿时代十分相近, 两者为同一构造热事件的产物。早子沟金矿区深部石英闪长岩年龄与蚀变脉岩型绢云母中 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄基本一致, 在稀土元素、微量元素标准化配分曲线上, 石英闪长岩以不具 Eu、Sr 异常和具较深的“Nb-Ta 谷”明显区别于浅部闪长玢岩、花岗斑岩、黑云母石英闪长玢岩, 反映其具不同的源区, 形成较晚, 在演化过程过程中受地壳混染影响较小。加之钻孔揭露的石英闪长岩全岩矿化、周围没有明显构造影响, 因此我们认为深部石英闪长岩为早子沟金矿的成矿地质体, 成矿作用与晚期的岩浆作用有关, 可能始于 230 Ma, 主成矿期为 230~211 Ma。石英闪长岩为深部隐伏侵入体, 在上升过程中使上部岩石产生穹窿、环形构造和垂直裂隙, 其携带的成矿物质卸载、沉淀, 形成陡倾矿体、缓倾矿体、环形-穹窿状矿体等不同的矿化样式。

6 结论

(1) 早子沟金矿区存在闪长玢岩、花岗斑岩、黑云母石英闪长玢岩、石英闪长岩 4 种侵入岩, 大多具有过铝质钙碱性特征, 均表现为轻稀土元素相对富集, 重稀土元素亏损, 富集大离子亲石元素 Rb、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 等特征。深部的石英闪长岩以高钾过铝、在微量元素原始地幔标准化和稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图上“Nb-Ta 谷”较深、不具 Eu、Sr 异常等特征与浅部脉岩明显区别。

(2) 早子沟金矿区 4 种侵入岩中石英闪长岩形成年龄 230.56 ± 0.96 Ma 明显晚于浅部脉岩 10~20 Ma, 与蚀变脉岩中绢云母年龄基本一致, 金成矿与深部石英闪长岩近于同期或晚 10~20 Ma。金矿成矿地质体为深部石英闪长岩, 成矿作用与区域较晚期的岩浆活动密切相关。

致谢 感谢甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院李鹏兵高级工程师、田向盛高级工程师以及早子沟金矿姜桂鹏总经理、郭军利等人在野外调研和项目实施过程中提供帮助和便利。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.
- Cao Xiaofeng, Mohamed Lamine Salifou Sanogo, Lü Xinbiao, *et al.* 2013. Analysis of metallogenic process of Zaozigou gold deposit in Gansu Province—The evidence from geological characteristics, occurrence state and stable isotope of the deposit[J]. *Journal of Jilin University (Geoscience Edition)*, 42(4): 1 039~1 054(in Chinese with English abstract).
- Chen Ruili, Chen Zhengle, Wu Junjie, *et al.* 2018. Characteristics of fluid inclusions and sulfur lead isotopes in the Hezuo Zaozigou gold deposit in Gansu Province[J]. *Journal of Jilin University: Geoscience Edition*, 48(1): 87~104(in Chinese with English abstract).
- Chen Yaoyu and Dai Wenjun. 2012. Discussion on geological characteristics and metallogenic model of Zaozigou gold deposit[J]. *Xinjiang Geology*, 30(1): 90~94(in Chinese with English abstract).

- Di Pengfei. 2018. Study on Geochemical Characteristics and Metallogenic Mechanism of Xiahe Hezaozigou Gold Deposit in the West Qinling Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 1~86 (in Chinese with English abstract).
- Gao Ting. 2011. Chronology, Geology and Geochemistry, Forming Tectonic Environment and Relationship with Mineralization of Important Intrusions in the Northern Part of Western Qinling [D]. Xi'an: Chang'an University, 1~82 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Qi and Wang Rongchao. 2010. Formation environment and genesis of Zaozigou gold deposit in Gansu Province[J]. Gold Science and Technology, 18(4): 37~40 (in Chinese with English abstract).
- Jin Weijun, Zhang Qi, He Dengfa, *et al.* 2005. Shrimp dating of adakite in West Qinling Mountains and its tectonic significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 959~966 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianwei, Sui Jixiang, Jin Xiaoye, *et al.* 2019. Gold mineralization system related to reductive intrusive rocks in Xiahe Hezuo area of the West Qinling Mountains and its dynamic background and exploration significance [J]. Geoscience frontier, 26 (5): 17~32 (in Chinese with English abstract).
- Li Kangning, Jia Ruya, Li Hongrui, *et al.* 2020. Gold copper polymetallic metallogenic system and prospecting prediction related to intermediate acid intrusive rocks in Xiahe Hezuo area, West Qinling Mountains, Gansu [J]. Geological Bulletin, 50 (8): 1 191~1 202 (in Chinese with English abstract).
- Li Kangning, Li Hongrui, Jia Ruya, *et al.* 2019. Construction of "Trinity" geological model for prospecting and prediction of Zaozigou gold deposit in Gansu[J]. Mineral Exploration, 10 (6): 1 397~1 408 (in Chinese with English abstract).
- Liang Zhilu, Chen Guozhong, Ma Hongshun, *et al.* 2016. Formation and evolution of ore controlling faults in Zaozigou gold deposit in the West Qinling Mountains[J]. Geotectonics and Metallogeny, 40 (2): 354~366 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunxian, Li Liang and Sui Jixiang. 2011. Mineralization characteristics and genesis of Zaozigou gold deposit in Gansu Province [J]. Geological Science and Technology Information, 30(6): 66~74 (in Chinese with English abstract).
- Liu J J, Liu C H, Carranza E J M, *et al.* 2015. Geological characteristics and ore-forming process of the gold deposits in the western Qinling region, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 103: 40~69.
- Liu Xiaolin. 2011. Geological characteristics and genetic analysis of Zaozigou gold deposit in Gansu[J]. Geology of Gansu, 20 (1): 52~56 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yong, Liu Yunhua, Dong Fuchen, *et al.* 2012. Precise determination of metallogenic age of Zaozigou gold deposit in Gansu Province and its geological significance[J]. Gold, 33 (11): 10~17 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Users manual for isoplot / Ex (rsv. 3.0): A Geochronologica Toolkit for Microsoft excel; Berkley[J]. Geochronology Center Special Publication, 1a: 1~55.
- Lü Xinbiao, Cao Xiaofeng, Mohamed Lamine Salifou Sanogo, *et al.* 2009. Geological characteristics, ore control structure and material sources of Zaozigou Gold Mine [J]. Acta Mineralogica Sinica, 29 (S1): 447~448 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 101: 635~643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 37(3~4): 215~224.
- Pan Guitang, Chen Zhiliang and Li Xingzhen. 1997. Formation and Evolution of Geological Structures in East Tethys[M]. Beijing: Geological Publishing House, 86~97 (in Chinese with English abstract).
- Pecerillo A and 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.
- Qiu K F, Yu H C, Deng J, *et al.* 2020. The giant Zaozigou orogenic Au-Sb deposit in West Qinling, China: Magmatic or metamorphic origin? [J]. Mineralium Deposita, 55(2): 345~362.
- Sui Jixiang and Li Jianwei. 2013. Metallogenic age and genesis of Zaozigou gold deposit in Xiahe Hezuo area, West Qinling Mountains [J]. Acta Mineralogica Sinica, 33 (S2): 346~347 (in Chinese).
- Sui J X, Li J W, Jin X Y, *et al.* 2018. ⁴⁰Ar-³⁹Ar and U-Pb constraints on the age of the Zaozigou gold deposit, Xiahe-Hezuo district, West Qinling orogen, China: Relation to early Triassic reduced intrusions emplaced during slab rollback[J]. Ore Geology Reviews, 101: 885~899.
- Sui J X, Li J W, Wen G, *et al.* 2017. The Dewulu reduced Au-Cu skarn deposit in the Xiahe-Hezuo district, West Qinling orogen, China implications for an intrusion-related gold system[J]. Ore Geology Reviews, 80: 1 230~1 244.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society of London Special Publication, 42: 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1~312.
- Wang Tao. 2018. Study on Geological Model of Mineralization and Prospecting Prediction of Zaozigou Gold Deposit in Xiahe-Hezuo Area, Gansu[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1~136 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zongqi, Liu Ping, Xie Chunlin, *et al.* 2009. New division of main tectonic units in the Qinling orogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica

- ca, 83 (11): 1 527~1 546(in Chinese with English abstract).
- Wright J B A. 1969. Simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. Geological Magazine, 106 (4): 370~384.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, *et al.* 2006. Qinghai Tibet Plateau and continental dynamics-deep driving forces of terrane amalgamation, collision orogeny and plateau uplift[J]. Geology of China, 33 (2): 221~238(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Ma Changqian, *et al.* 2010. Composite orogeny and scientific problems of China's Central Orogenic Belt [J]. Geology of China, 37 (1): 1~11(in Chinese with English abstract).
- Yin Hongfu, Zhang Kexin and Feng Qinglai. 2004. The archipelagic ocean system of eastern Eurasian Tethys[J]. Acta Geologica Sinica, 78(1): 230~236.
- Ye Tianzhu, Lü Zhicheng and Pang Zhenshan. 2014. Ore Prospecting Prediction Theory and Method in Exploration Area (general) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~703(in Chinese with English abstract).
- Ye Tianzhu, Wei Changshan and Wang Yuxiang. 2017. Ore Prospecting Prediction Theory and Method in Exploration Area (Various Theories)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~594(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin and Yao Anping. 2004. The West Qinling Songpan continental tectonic junction in the structure of the Chinese Mainland[J]. Geoscience Frontier, 11 (3): 23~32 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jizhen, Chen Guozhong, Liang Zhilu, *et al.* 2013. Ore body and geochemical characteristics of Zaozigou gold deposit [J]. Gansu Geology, 22(2): 38~43(in Chinese with English abstract).
- 曹晓峰, Mohamed Lamine Salifou Sanogo, 吕新彪, 等. 2012. 甘肃枣子沟金矿床成矿过程分析——来自矿床地质特征、金的赋存状态及稳定同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42 (4): 1 039~1 054.
- 陈瑞莉, 陈正乐, 伍俊杰, 等. 2018. 甘肃合作早子沟金矿床流体包裹体及硫铅同位素特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 48 (1): 87~104.
- 陈耀宇, 代文军. 2012. 枣子沟金矿地质特征及成矿模式探讨[J]. 新疆地质, 30(1): 90~94.
- 第鹏飞. 2018. 西秦岭夏河-合作早子沟金矿床地球化学特征及成矿机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 1~86.
- 高 婷. 2011. 西秦岭西段北部重要侵入体年代学、地质地球化学、形成构造环境及与成矿作用关系[D]. 西安: 长安大学, 1~82.
- 姜 琪, 王荣超. 2010. 甘肃枣子沟金矿床形成环境及矿床成因[J]. 黄金科学技术, 18(4): 37~40.
- 金维浚, 张 旗, 何登发, 等. 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 21(3): 959~966.
- 李建威, 隋吉祥, 靳晓野, 等. 2019. 西秦岭夏河-合作地区与还原性侵入岩有关的金成矿系统及其动力学背景和勘查意义[J]. 地质前缘, 26(5): 17~32.
- 李康宁, 贾儒雅, 李鸿睿, 等. 2020. 西秦岭甘肃夏河-合作地区与中酸性侵入岩有关的金铜多金属成矿系统及找矿预测[J]. 地质通报, 50(8): 1 191~1 202.
- 李康宁, 李鸿睿, 贾儒雅, 等. 2019. 甘肃早子沟金矿“三位一体”找矿预测地质模型的构建[J]. 矿产勘查, 10(6): 1 397~1 408.
- 梁志录, 陈国忠, 麻红顺, 等. 2016. 西秦岭早子沟金矿控矿断裂形成演化[J]. 大地构造与成矿学, 40(2): 354~366.
- 刘春先, 李 亮, 隋吉祥. 2011. 甘肃枣子沟金矿的矿化特征及矿床成因[J]. 地质科技情报, 30(6): 66~74.
- 刘晓林. 2011. 甘肃枣子沟金矿床地质特征及成因分析[J]. 甘肃地质, 20(1): 52~56.
- 刘 勇, 刘云华, 董福辰, 等. 2012. 甘肃枣子沟金矿床成矿时代精确测定及其地质意义[J]. 黄金, 33(11): 10~17.
- 吕新彪, 曹晓峰, Sanogo L S, 等. 2009. 枣子沟金矿地质特征、控矿构造及物质来源探讨[J]. 矿物学报, 29(S1): 447~448.
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 1997. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 86~97.
- 隋吉祥, 李建威. 2013. 西秦岭夏河-合作地区枣子沟金矿床成矿时代与矿床成因[J]. 矿物学报, 33(S2): 346~347.
- 王 涛. 2018. 甘肃夏河-合作矿集区早子沟金矿成矿作用与找矿预测地质模型研究[D]. 北京: 中国地质大学, 1~136.
- 王宗起, 刘 平, 谢春林, 等. 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): 1 527~1 546.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 2006. 青藏高原与大陆动力学-地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. 中国地质, 33 (2): 221~238.
- 杨经绥, 许志琴, 马昌前, 等. 2010. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J]. 中国地质, 37(1): 1~11.
- 叶天竺, 吕志成, 庞振山. 2014. 勘查区找矿预测理论与方法(总论)[M]. 北京: 地质出版社, 1~703.
- 叶天竺, 韦昌山, 王玉往. 2017. 勘查区找矿预测理论与方法(各论)[M]. 北京: 地质出版社, 1~594.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结[J]. 地质前缘, 11(3): 23~32.
- 赵积珍, 陈国忠, 梁志录, 等. 2013. 早子沟金矿矿体特征及地球化学特征[J]. 甘肃地质, 22(2): 38~43.

附中文参考文献