

· 专题研究 ·

西秦岭早子沟金矿黑云母成分特征及成岩 成矿指示意义

李康宁^{1,2}, 贾儒雅³, 李鸿睿^{1,2}, 王玉玺^{1,2}, 吴 锋⁴, 严 康^{1,2}, 张世珍^{1,2}

(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. 中国冶金地质总局 西北地质勘查院, 陕西 西安 710119)

摘要: 甘肃省夏河-合作矿集区是西秦岭造山带中重要的金矿富集区之一, 早子沟金矿为其中最为著名的特大型矿床, 矿区中酸性脉岩极为发育, 与成矿具有密切联系。本次在早子沟金矿床野外调研的基础上, 针对矿区主要脉岩中的黑云母进行了电子探针分析。结果表明, 早子沟金矿中酸性脉岩中主要为岩浆黑云母, 黑云母中 FeO_1 含量为 19.71%~29.84%, MgO 含量为 9.54%~13.51%, 兼有镁质、铁质黑云母的特点; 黑云母的结晶温度为 776.61~799.65°C, 结晶压力为 131~283 MPa, 氧逸度 $lg f_{O_2}$ 为 -14.85~-13.11, 表现为高温、低压、较高氧逸度的特征。通过黑云母化学成分特征分析表明早子沟金矿脉岩属钙碱性花岗岩, 为壳幔混源成因。早子沟金矿脉岩黑云母的这些矿物化学特征及其所指示的地质背景, 揭示了早子沟脉岩代表的该套岩浆为形成大型热液矿床创造了有利条件。

关键词: 早子沟金矿; 黑云母; 壳幔混源; 氧逸度

中图分类号: P578.959

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)05-0865-15

Composition characteristics of biotite and its implications for diagenesis and mineralization in Zaozigou gold deposit, Western Qinling

LI Kang-ning^{1,2}, JIA Ru-ya³, LI Hong-rui^{1,2}, WANG Yu-xi^{1,2}, WU Feng⁴, YAN Kang^{1,2} and ZHANG Shi-zhen^{1,2}

(1. The Third Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, 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. Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Xi'an 710119, China)

Abstract: The Xiahe-Hezuo Mining area in Gansu Province is one of the important gold deposit dense areas in the West Qinling orogen. The Zaozigou gold deposit is the most famous giant gold deposit in this area. The veined intermediate to acid magmatic rocks are commonly developed in the Zaozigou gold mining area, which are closely related to mineralization. Based on the field investigation of the geological characteristics of the Zaozigou giant gold deposit, the electron microprobe analysis of the biotite was carried out on the veined intermediate to acid magmatic rocks in the mining area. The detailed results show that the FeO_1 contents of biotites range from 19.71% to 29.84%,

收稿日期: 2021-11-27; 接受日期: 2022-07-27; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0601506); 甘肃省地矿局科技创新项目(2021CX03); 甘肃省地质勘查基金项目(202202-D01)

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调查评价与找矿预测工作, E-mail: 379607468@qq.com; 通讯作者: 贾儒雅(1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩石学、矿床学和找矿预测理论研究工作, E-mail: cgsjry@qq.com。

and the MgO contents range from 9.54% to 13.51%. They show the characteristics of both magnesian biotite and iron biotite. The crystallization temperatures of biotite are 776.61°C to 799.65°C, the crystallization pressures range from 131 MPa to 283 MPa, and the oxygen fugacity $\lg f_{O_2}$ are -14.85 to -13.11. The biotites are characterized by high temperature, low pressure and relatively high oxygen fugacity. The geochemical composition characteristics of biotites show that the veined magmatic rocks in the Zaozigou gold deposit belongs to calc-alkaline granite, which is derived from mixed crust and mantle origin. The mineral chemical characteristics of biotite of the veined magmatic rocks of Zaozigou gold mine and the geological background revealed that the magmatism which the Zaozigou veined magmatic rocks represented contribute to the mineralization of the giant gold hydrothermal deposit.

Key words: Zaozigou gold deposit; biotite; crust-mantle mixed source; oxygen fugacity

Fund support: National Key R & D Project (2017YFC0601506); Scientific and Technological Innovation Project of Gansu Bureau of Geology and Mineral Resource (2021CX03); Gansu Geological Exploration Fund Project (202202-D01)

甘肃省夏河-合作矿集区是西秦岭地区重要的金矿富集区之一,大地构造位置属西秦岭造山带的西北部,处在华北板块和扬子板块的结合部位,地质构造复杂,成矿条件优越,近30年来,累计发现金矿(化)点80多处,其中特大型矿床2处(早子沟金矿、加甘滩金矿)、大型矿床2处(以地南金矿、岗岔金矿)、中型矿床5处,探明金资源量约450 t。甘肃早子沟金矿行政区划属甘南州合作市,1996年根据群众报矿首次发现,之后通过20多年的持续勘查,查明金资源储量超过150 t。关于早子沟金矿的成因认识,主要有构造蚀变岩型(吕新彪等,2009;姜琪等,2010;陈耀宇等,2012;赵积珍等,2013)、微细浸染型(卡林型)(刘春先等,2011;曹晓峰等,2012; Liu *et al.*, 2015)和斑岩型(刘勇等,2012)。近年来,一些学者认为早子沟及其周边金矿床的成矿作用与岩浆热液有关,因而将这一区域的早子沟、老豆、以地南、早仁道等金矿划分为与中酸性侵入岩有关的金矿床(Jin *et al.*, 2017; Sui *et al.*, 2017, 2018; 李康宁等, 2020a)。

黑云母是中酸性岩浆岩重要的造岩矿物,其特殊的晶体结构和矿物化学特征能够反映成岩环境、热液作用、成矿元素富集及其物理化学条件等相关信息(Wones and Eugster, 1965; 陈光远等, 1988; Burkhard, 1991; 周作侠, 1991)。黑云母在早子沟金矿各类中酸性脉岩中普遍发育,包含了许多成岩成矿信息,但前人关注较少,未做过专门研究。本文在充分收集早子沟金矿勘查成果和野外调研的基础上,对主要岩浆岩中的黑云母开展系统的化学成分研究,以揭示其形成过程中的物理化学条件及其

对成岩成矿的指示意义,为找矿预测和进一步找矿勘查提供方向和理论依据。

1 区域地质背景

夏河-合作地区主要构造线呈NW向,出露晚古生代、中生代地层,整体呈一背斜构造。其中石炭系、二叠系分布在夏河-合作断裂以北,石炭系为背斜核部,岩性为石英砂岩、石英长石砂岩、板岩、生物碎屑灰岩等。二叠系岩性为石英长石砂岩、砾屑灰岩、泥灰岩等。三叠系主要分布在夏河-合作断裂以南,为一套砂板岩互层复理石建造,局部见强烈变形的灰岩。侵入岩在北部分布较多,由德合日二长花岗岩-三索玛花岗闪长岩-德乌鲁花岗闪长岩-美武花岗闪长岩等侵入体组成NW向岩浆弧,侵入岩时代集中于250~210 Ma(李康宁等, 2020b)。火山岩较少,在夏河县北部红墙和合作市东北部德乌鲁一带分别出露白垩纪和三叠纪火山岩,白垩纪火山岩主要为溢流相的玄武岩,三叠纪火山岩分布面积较大,岩性主要为安山岩、流纹岩及其相应的火山碎屑岩组合。区内成矿以内生金属矿为主,具有明显的分带性:北部为多金属成矿带,发育Cu、Au、Fe、W、Pb、Zn、Bi等以中高温元素为主的矿化,矿化受岩体边缘接触带及不同方向断层交汇部位控制,矿床类型主要为热液脉型、矽卡岩型和斑岩型,已知矿床主要有录斗艘金矿、以地南铜金矿、德乌鲁铜金矿、美武铁矿等。南部为Au、Hg、As、Sb等中低温元素成矿带,矿化主要受断裂破碎带控制,矿床类型主要为构造蚀变岩型和石英脉型,代表性矿床

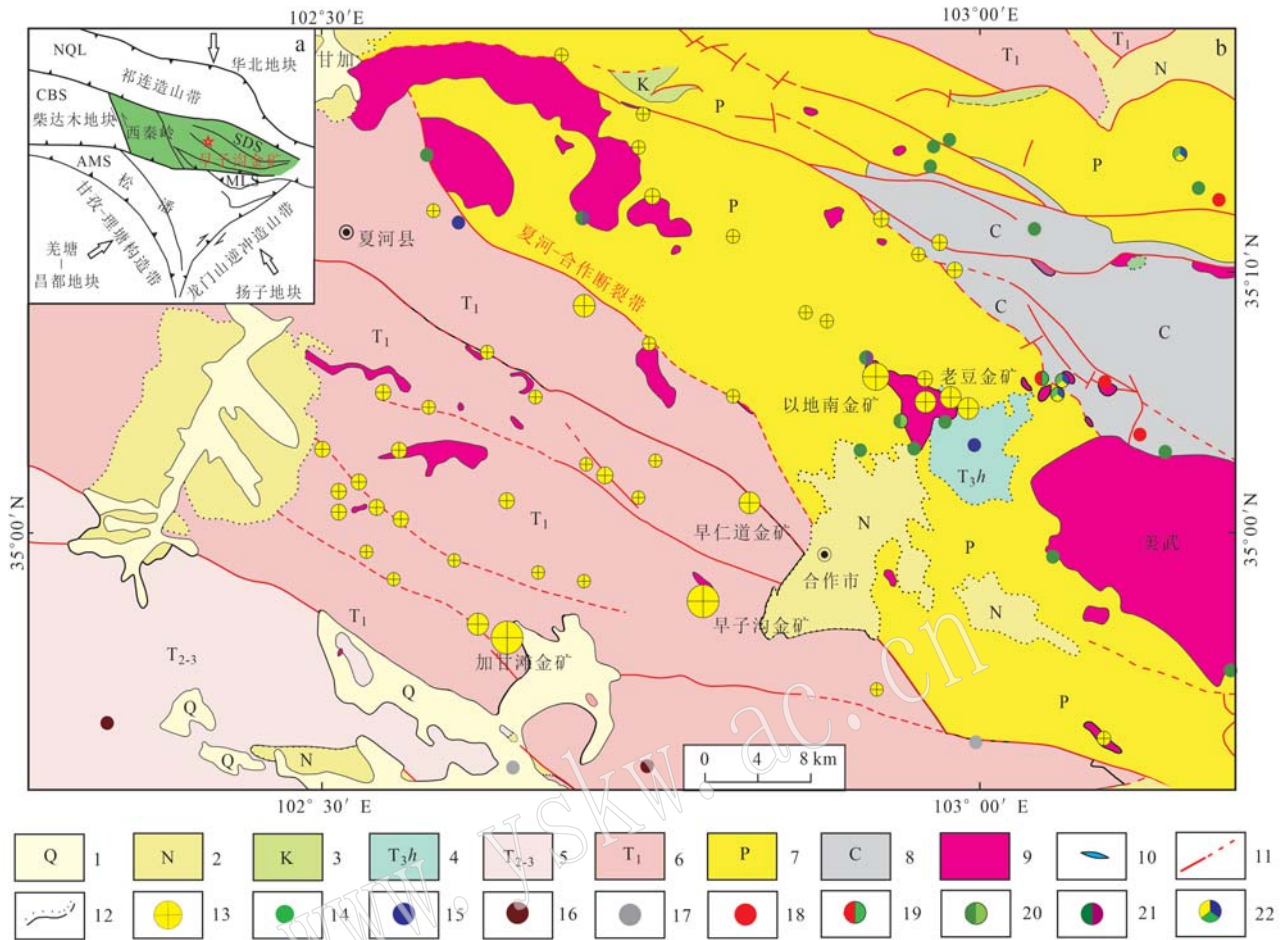


图1 夏河-合作地区地质简图(据张国伟等, 2004; 李康宁等, 2020a)

Fig. 1 Geologic map of Xiahe-Hezuo area (after Zhang Guowei *et al.*, 2004; Li Kangning *et al.*, 2020a)

1—第四系; 2—新近系; 3—白垩系; 4—上三叠统华日组; 5—中上三叠统; 6—下三叠统; 7—二叠系; 8—石炭系; 9—中酸性花岗岩; 10—中酸性脉岩; 11—断裂; 12—角度不整合界线; 13—金矿; 14—铜矿; 15—铅矿; 16—锑矿; 17—汞矿; 18—铁矿; 19—铁铜矿; 20—铜钼矿; 21—铜钨矿; 22—多金属矿; CBS—柴北缘古缝合带; SDS—高丹古缝合带; AMS—阿尼玛卿古缝合带; NQL—北祁连缝合带; MLS—勉略古缝合带

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Cretaceous; 4—Huari Formation of Upper Triassic; 5—Middle-Lower Triassic; 6—Lower Triassic; 7—Permian; 8—Carboniferous; 9—intermediate acid granite; 10—intermediate acid dyke; 11—fault; 12—angular unconformity boundary; 13—gold deposit; 14—copper deposit; 15—lead deposit; 16—antimony deposit; 17—mercury deposit; 18—iron deposit; 19—iron-copper deposit; 20—copper molybdenum deposit; 21—copper tungsten deposit; 22—polymetallic deposit; CBS—northern margin of Qaidam Basin paleo-suture belt; SDS—Shangnan-Danfeng paleo-suture belt; AMS—Animaqing paleo-suture belt; NQL—North Qilian suture belt; MLS—Mianxian-Lüeyang paleo-suture belt

主要有早子沟金矿、加甘滩金矿、早仁道锑金矿、牙利吉锑矿等(图 1b)。

2 矿区地质特征

矿区地层简单, 仅见早三叠世江里沟组, 整体近南北向展布(图 2), 出露两个岩性段: 第 1 岩性段为硅质板岩、钙质板岩、粉砂质板岩; 第 2 岩性段为硅质板岩、粉砂质板岩、灰岩。受脉岩和构造影

响, 地层变形强烈, 产状杂乱。花岗质脉岩发育集中, 主要有闪长岩脉、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。前人对早子沟金矿脉岩年龄进行了大量测定, 除刘勇等(2012)获得闪长岩脉年龄较小外, 其余脉岩侵位时代的锆石 U-Pb 年龄集中在 249~235 Ma(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。矿区断裂极为发育, 可大致分为 NW、SN、NE、NNE、EW 5 组, 其中

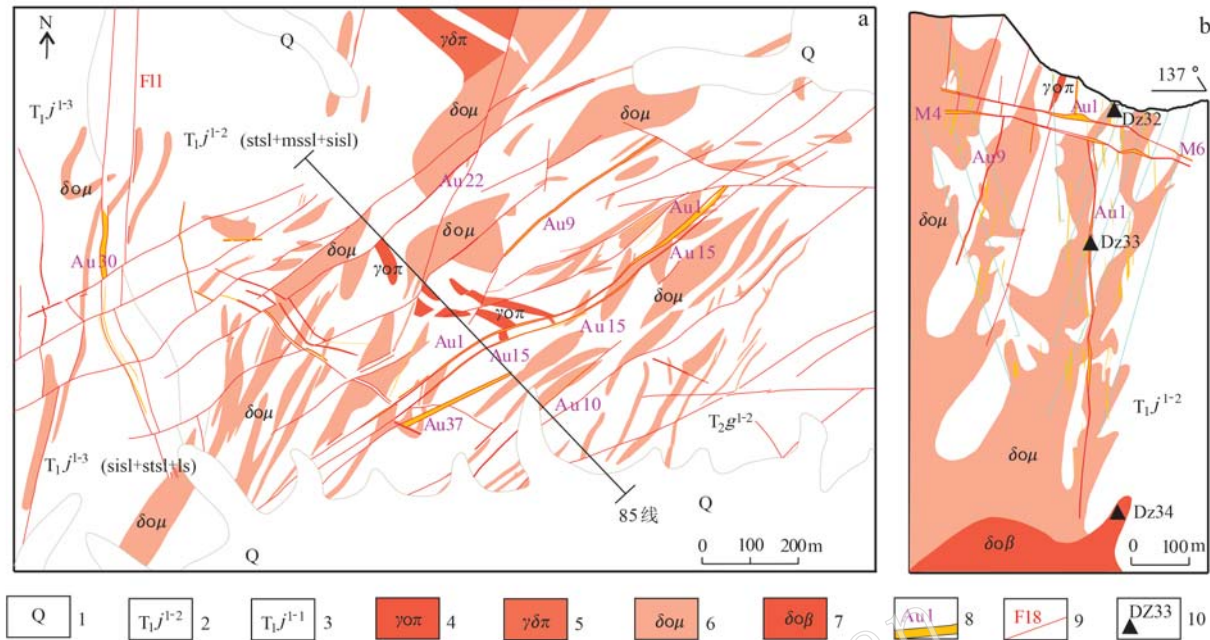


图2 早子沟金矿地质图(a)及85勘查线剖面图(b)

Fig. 2 Geologic map(a) and No. 85 prospecting profile(b) of the Zaozigou gold deposit

1—第四系; 2—早三叠世江里沟组一段第2岩性段; 3—早三叠世江里沟组一段第1岩性段; 4—斜长花岗岩斑岩; 5—花岗闪长斑岩;
6—石英闪长玢岩; 7—黑云母石英闪长岩; 8—金矿体及编号; 9—断裂及编号; 10—采样位置及编号

1—Quaternary; 2—the second lithologic member of the first member of Jiangligou Formation in the Early Triassic; 3—the first lithologic member of the first member of Jiangligou Formation in the Early Triassic; 4—plagioclase granite porphyry; 5—granodiorite porphyry; 6—quartz diorite porphyrite; 7—biotite quartz diorite; 8—gold ore body and number; 9—fracture and number; 10—sampling location and number

NE、SN、NW 向3组断裂为矿区主要控矿断裂, 分别控制着 NE、SN、NW 向矿带的形成与展布(陈国忠等, 2013; 梁志录等, 2016)。

早子沟金矿矿体受断裂和侵入体双重控制, 目前共圈定金矿体523条, 主矿体18条, 矿体形态主要呈似层状、脉状、囊状。NE向矿带延长大于1000m, 宽大于300m, 矿脉蚀变矿化强, 品位高, 品位、厚度在走向和倾向上呈现波状分布特征, 代表性矿体有Au1、Au9。SN向矿化带延长大于1000m, 宽大于500m, 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, 代表性矿体有Au29、Au30、Au31等。NW向矿体倾角普遍较缓, 为隐伏矿体, 倾向变化较大, 具有环形分布的特征, 形成富含Au、Sb的高品位盲矿体, 代表性矿体有M4、M5、M6等。

早子沟金矿原生矿石主要有蚀变板岩型、蚀变脉岩型和石英辉锑矿型、蚀变砂岩型矿石4种。前两种类型主要产于近SN向和NE向的陡倾角矿体中, 后两种类型主要产于NW向的缓倾角矿体中。

矿石中金属矿物主要为黄铁矿、毒砂金、辉锑矿、金等, 脉石矿物主要为石英、斜长石、黑云母、方解石和绢云母等。根据矿物共生组合和标型特征, 早子沟金矿划分为5个成矿阶段(李康宁等, 2019b; 李鹏兵, 2020): ①成矿期前相对氧化阶段, 形成早期硅化、赤铁矿化、黑云母化(钾化); ②成矿早期还原矿化阶段, 矿物生成顺序为石英→黄铁矿→毒砂→自然金, 黑云母普遍发生褪色蚀变, 为矿床的主要成金阶段; ③成矿晚期弱还原矿化阶段, 石英-辉锑矿阶段, 矿物生成顺序为石英→黄铁矿→毒砂→自然金→辉锑矿, 为矿床的较主要成金阶段; ④成矿期后弱氧化矿化阶段, 主要为石英-碳酸盐化阶段, 矿物组合及生成顺序为石英→方解石→高岭土等; ⑤表生期氧化阶段, 金属硫化物在地表及浅部氧化成褐铁矿、锑华等。黑云母作为蚀变脉岩型矿石的主要组成矿物, 主要出现在成矿期前, 既是岩浆岩的组成部分, 也是早期面型蚀变(钾化)的矿物学表现, 代表了含矿岩浆活动开始。后期随着构造-流体作用, 黑云母普遍发生褪色蚀变(绢云母

化、绿泥石化、高岭土化等)，同时伴随着金矿的沉淀。

3 样品采集与测试

早子沟金矿床中黑云母在各类脉岩均有出现，主要分布在黑云母石英闪长玢岩、黑云母石英闪长岩、花岗闪长斑岩中，黑云母呈斑晶产出，呈片状或长条

状，单偏光下黄棕色到黄褐色，具有明显的多色性，节理发育，解理完全，粒径为 0.2~1.0 mm。岩浆黑云母与热液黑云母手标本难以区分，在镜下，岩浆黑云母常呈黄棕色，半自形，热液黑云母呈黑色，半自形-它形，弥散状或沿岩浆黑云母边缘、解理分布。蚀变较强，被后期的绿泥石、绢云母等交代，晶形具有裂片、散口、扭曲等特征，常呈交代残余、破布状；部分黑云母可见硫化物、氧化物析离体(图 3)。

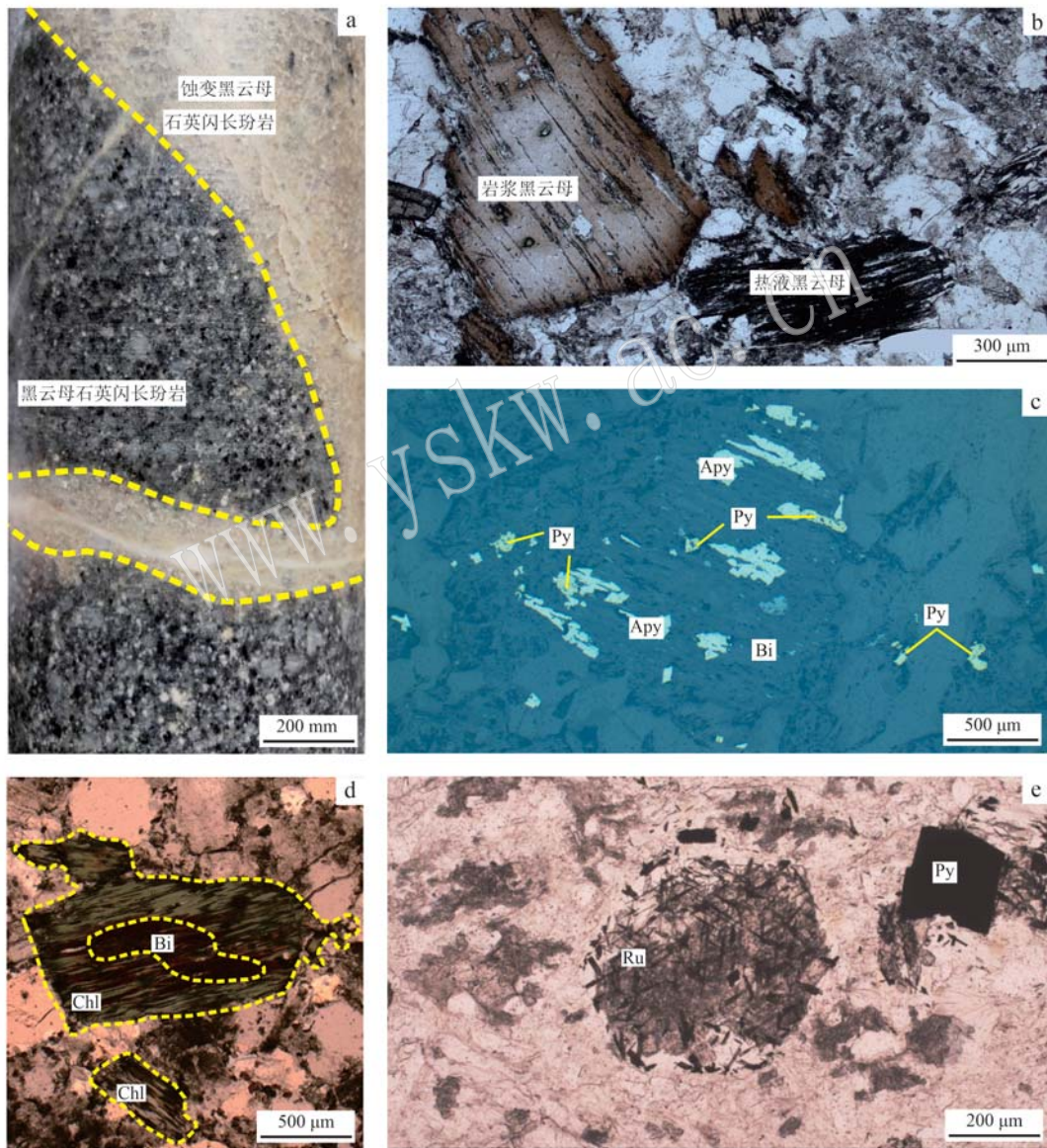


图 3 早子沟金矿黑云母照片

Fig. 3 Photographs of biotite from Zaogou gold deposit

a—黑云母石英闪长玢岩(岩心标本); b—岩浆黑云母和热液黑云母(正交偏光); c—黄铁矿沿黑云母解理分布(反射光); d—黑云母边缘发生绿泥石化(正交偏光); e—黑云母中见金红石析离体(单偏光); Bi—黑云母; Chl—绿泥石; Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Ru—金红石
 a—biotite quartz diorite porphyrite (core specimen); b—magmatic biotite and hydrothermal biotite (orthogonally polarized); c—pyrite distributes phenocrysts along the cleavage of biotite (reflected light); d—chloritization occurs at the edge of biotite(orthogonally polarized); e—rutile exfoliation can be seen in biotite (single polarized light); Bi—biotite; Chl—chlorite; Py—pyrite; Apy—arsenopyrite; Ru—rutile

本次用于研究的黑云母分别采自蚀变较弱的黑云母石英闪长玢岩(DZ32)、黑云母闪长玢岩(DZ33)、黑云母石英闪长岩(DZ34)。测试工作由南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成,仪器型号为JEOL JXA8300型电子探针仪,检测限 $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 。标样采用钠长石(Na、Al、Si)、橄榄石(Mg)、镁橄榄石(Fe)、磷灰石(P、Ca)、硅灰石

(Mn)、金云母(K)和金红石(Ti)。黑云母的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 值由林文蔚等(1994)给出的待定阳离子数法计算得到,黑云母阳离子数以22个氧原子为基础计算,电子探针数据分析处理、参数计算主要采用Geokit软件(路远发,2004)完成。早子沟脉岩黑云母电子探针分析数据及相关参数见表1。

表1 早子沟金矿黑云母电子探针成分表

 $w_B/\%$

Table 1 EMPA analysis results of biotite from Zaozigou gold deposit

岩石名称	黑云母石英闪长玢岩				黑云母闪长玢岩								
	DZ32-01	DZ32-02	DZ32-03	DZ32-04	DZ33-02	DZ33-03	DZ33-04	DZ33-05	DZ33-06	DZ33-07	DZ33-08	DZ33-09	DZ33-10
SiO ₂	36.18	35.92	27.27	35.80	36.09	36.50	36.52	36.30	36.55	36.50	36.44	37.11	36.56
TiO ₂	3.63	3.83	0.12	4.02	3.88	4.04	3.72	3.89	3.87	3.49	3.75	3.59	3.47
Al ₂ O ₃	14.73	14.95	17.36	14.64	14.98	14.69	15.06	14.72	14.30	14.57	14.84	15.22	14.57
FeO _I	22.07	21.88	29.28	22.39	20.29	20.42	20.68	19.87	20.23	21.16	20.80	20.02	19.71
MnO	0.17	0.24	0.32	0.27	0.16	0.14	0.18	0.21	0.20	0.17	0.22	0.24	0.17
MgO	10.00	10.01	13.51	9.54	10.39	10.91	10.79	10.90	11.00	10.87	10.39	10.67	11.43
CaO		0.01	0.05	0.06					0.01				0.04
Na ₂ O	0.09	0.18	0.00	0.14	0.13	0.06	0.16	0.10	0.12	0.08	0.05	0.14	0.11
K ₂ O	9.31	8.66	0.05	9.13	8.94	9.04	9.47	9.31	9.52	9.17	9.22	9.35	9.19
Cl	0.04	0.04		0.06	0.03	0.05	0.06	0.03	0.05	0.07	0.04	0.04	0.05
Total	96.2	95.71	87.96	96.03	94.88	95.83	96.62	95.35	95.82	96.29	95.73	96.37	95.28
氧原子数	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Si	5.72	5.47	4.57	5.47	5.74	5.52	5.72	5.52	5.78	5.56	5.76	5.57	5.76
Al ^{IV}	2.28	2.53	3.43	2.53	2.26	2.48	2.28	2.48	2.22	2.44	2.24	2.43	2.24
Al ^{VI}	0.47	0.16	0	0.11	0.55	0.13	0.50	0.16	0.44	0.17	0.52	0.26	0.46
Ti	0.43	0.44	0.02	0.46	0.46	0.46	0.44	0.44	0.46	0.40	0.45	0.41	0.41
Fe _I	2.92	2.79	4.10	2.86	2.70	2.58	2.71	2.53	2.68	2.70	2.75	2.51	2.60
Mn	0.02	0.03	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02
Mg	2.36	2.27	3.37	2.17	2.46	2.46	2.52	2.47	2.59	2.47	2.45	2.38	2.68
Ca			0.01	0.01									0.01
Na	0.03	0.05		0.04	0.04	0.02	0.05	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03
K	1.88	1.68	0.01	1.78	1.81	1.74	1.89	1.81	1.92	1.78	1.86	1.79	1.85
Cl	0.01	0.01		0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
sum	16.11	15.43	15.54	15.48	16.05	15.41	16.13	15.46	16.15	15.56	16.06	15.42	16.07
Al ^T	2.75	2.68	3.43	2.64	2.81	2.62	2.78	2.64	2.66	2.61	2.76	2.69	2.70
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ +Mg)	0.55	0.55	0.55	0.57	0.52	0.51	0.52	0.51	0.51	0.52	0.53	0.51	0.49
Al ^{VI} +Fe ³⁺ +Ti	1.14	0.98	0.37	0.95	1.28	0.97	1.17	0.96	1.13	0.93	1.23	1.03	1.12
p/MPa	167	160	283	146	186	140	178	146	143	139	173	162	156
h/km	6.07	5.82	10.29	5.32	6.76	5.09	6.48	5.31	5.20	5.06	6.28	5.90	5.68
t/°C	783.04	787.19		789.46	797.16	799.69	791.84	797.27	798.97	782.09	791.56	785.55	789.76
镁质率	0.44	0.45	0.45	0.43	0.48	0.49	0.48	0.49	0.49	0.48	0.47	0.48	0.51
氧化系数	0.13	0.14	0.10	0.13	0.15	0.15	0.13	0.14	0.13	0.13	0.14	0.15	0.14
log f _{O₂}	-14.30	-14.19		-14.13	-13.92	-13.85	-14.06	-13.92	-13.87	-14.33	-14.07	-14.24	-14.12

续表 1

Continued Table 1

岩石名称	黑云母石英闪长岩											
	DZ34-01	DZ34-02	DZ34-05	DZ34-06	DZ34-07	DZ34-08	DZ34-10	DZ34-11	DZ34-12	DZ34-13	DZ34-03	
测点号												
SiO ₂	36.79	36.97	36.14	36.12	36.66	36.37	36.43	36.23	36.25	36.45	37.85	
TiO ₂	3.97	3.72	4.05	3.68	3.75	3.90	4.05	3.82	3.90	3.61	0.03	
Al ₂ O ₃	14.68	14.67	14.53	14.37	14.52	14.62	14.22	14.47	14.20	14.89	24.09	
FeO _I	22.44	22.17	22.65	22.62	22.03	22.44	21.66	23.15	22.73	22.58	13.00	
MnO	0.25	0.17	0.23	0.19	0.21	0.17	0.17	0.23	0.24	0.23		
MgO	10.07	10.07	9.64	9.57	9.85	9.82	10.01	9.74	10.01	9.68		
CaO		0.06	0.01			0.01	0.01		0.02		23.30	
Na ₂ O	0.12	0.18	0.10	0.19	0.18	0.14	0.17	0.18	0.19	0.15	0.02	
K ₂ O	9.09	9.05	9.19	9.21	9.29	9.30	8.95	9.18	9.48	8.60		
Cl	0.06	0.04	0.06	0.08	0.06	0.06	0.10	0.05	0.14	0.11	0.02	
Total	97.44	97.09	96.60	96.00	96.53	96.81	95.73	97.05	97.12	96.27	97.05	
氧原子数	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	
Si	5.52	5.78	5.49	5.75	5.55	5.74	5.80	5.50	5.74	5.53	7.28	
Al ^{IV}	2.48	2.22	2.51	2.25	2.45	2.26	2.20	2.50	2.26	2.47	0.72	
Al ^{VI}	0.11	0.48	0.10	0.45	0.15	0.46	0.46	0.08	0.39	0.19	2.45	
Ti	0.45	0.44	0.46	0.44	0.43	0.46	0.49	0.44	0.46	0.41	0.06	
Fe _I	2.82	2.90	2.88	3.01	2.79	2.96	2.88	2.94	3.01	2.86	0.41	
Mn	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	
Mg	2.25	2.34	2.18	2.27	2.23	2.31	2.37	2.20	2.36	2.19	0.28	
Ca		0.01									0.77	
Na	0.03	0.05	0.03	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.06	0.04	1.86	
K	1.74	1.80	1.78	1.87	1.80	1.87	1.82	1.78	1.92	1.66	0.25	
Cl	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.04	0.03	0.00	
sum	15.44	16.05	15.47	16.13	15.47	16.14	16.10	15.52	16.23	15.39	14.08	
Al ^T	2.60	2.70	2.60	2.70	2.59	2.72	2.67	2.59	2.65	2.66	3.16	
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ +Mg)	0.56	0.55	0.57	0.57	0.56	0.56	0.55	0.57	0.56	0.57	0.59	
Al ^{VI} +Fe ³⁺ +Ti	0.95	1.20	0.94	1.14	0.95	1.16	1.20	0.88	1.03	1.01	2.61	
p/MPa	133	155	136	153	133	158	142	131	135	154	306	
h/km	4.85	5.64	4.94	5.56	4.82	5.75	5.16	4.76	4.92	5.58	11.12	
t/°C	788.37	784.92	789.62	782.07	783.02	789.29	796.92	782.33	789.58	776.61	370.00	
镁质率	0.44	0.45	0.43	0.43	0.44	0.44	0.45	0.43	0.44	0.43	0.40	
氧化系数	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.12	0.12	0.14	0.24	
log f _{O₂}	-14.16	-14.25	-14.12	-14.33	-14.30	-14.13	-13.92	-14.32	-14.12	-14.48	-13.11	

注：空白表示低于检测限。

4 矿物化学特征

通过分析电子探针数据(表1)可以看出, DZ34-03(后面数据统计及计算均不包含此数据)可能受风化、蚀变等影响较为严重,表现出明显的高硅铝钙、低铁镁钾的特征,其他黑云母数据较为均一:黑云母中 FeO_I 含量为 19.71%~29.84%, 平均 21.88%; MgO 含量为 9.54%~13.51%, 平均 10.38%。Fe²⁺/(Mg+Fe²⁺) 值为 0.49~0.57, 平均 0.54, 变化幅度

较小,说明受后期流体改造作用的影响较少(Stone, 2000; 张有军等, 2015)。此外,脉岩中黑云母 CaO 含量极低,大多未检出,基本不受后期流体热液蚀变(碳酸盐化、绿泥石化)影响(Santosh and Manjari, 2010),表明早子沟脉岩中的黑云母绝大多数产生于原生岩浆结晶作用。在 10 TiO₂-FeO* - MgO (FeO* = FeO_I+MnO) 三角分类图解(Nachit *et al.*, 2005)中,绝大多数黑云母都落在岩浆黑云母的范围内(图4a),只有3个点落在新生黑云母中,说明有少量热液黑云母形成。在黑云母的 Mg-(Al^{VI}+Ti)

$Fe^{3+}+Ti)-(Fe^{2+}+Mn)$ 分类图解 (Foster, 1960) 中, 黑云母成分投点均落在镁质黑云母和铁质黑云母的分界线附近 (图 4b), 黑云母闪长玢岩脉中的黑云母趋向镁质黑云母, 黑云母石英闪长岩脉中的黑云母则

趋向铁质黑云母。

黑云母化学成分图解 (图 5) 显示, Fe_t 与 Mn 呈现正相关性, Fe_t 、Mn 值与 Mg 值呈现负相关性。黑云母结晶过程中 Mg、 Fe_t 相对于 Al 有着不一样的地

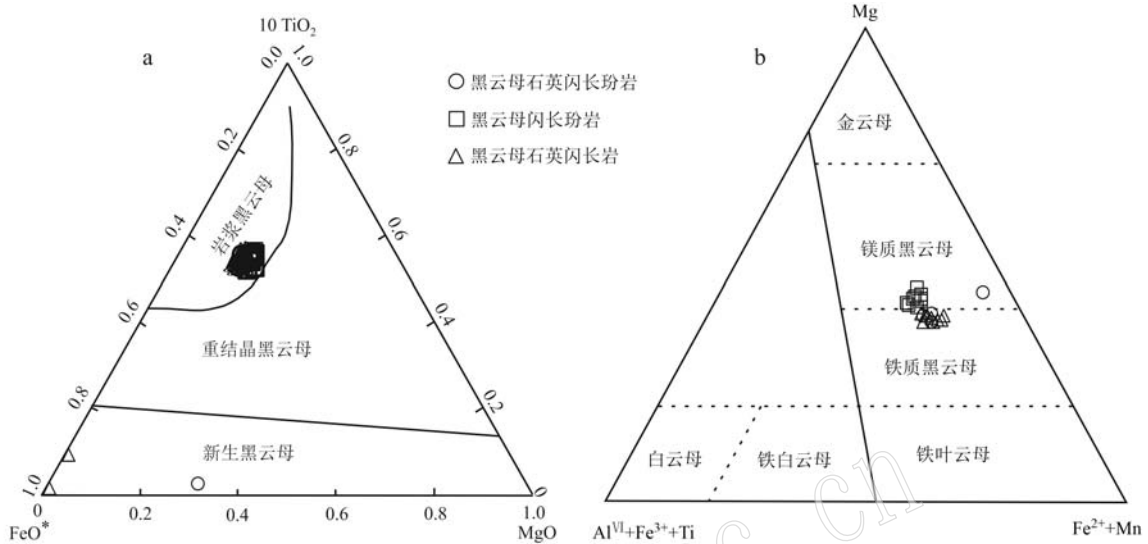


图 4 早子沟金矿黑云母 $10 TiO_2-FeO^*-MgO$ 判别图解 (a, 底图据 Nachit *et al.*, 2005) 和 $Mg-(Al^{VI}+Fe^{3+}+Ti)-(Fe^{2+}+Mn)$ 分类图 (b, 底图据 Foster, 1960)

Fig. 4 $10 TiO_2-FeO^*-MgO$ discrimination diagram (a, after Nachit *et al.*, 2005) and $Mg-(Al^{VI}+Fe^{3+}+Ti)-(Fe^{2+}+Mn)$ classification diagram (b, after Foster, 1960) of biotite species from Zaozigou gold deposit

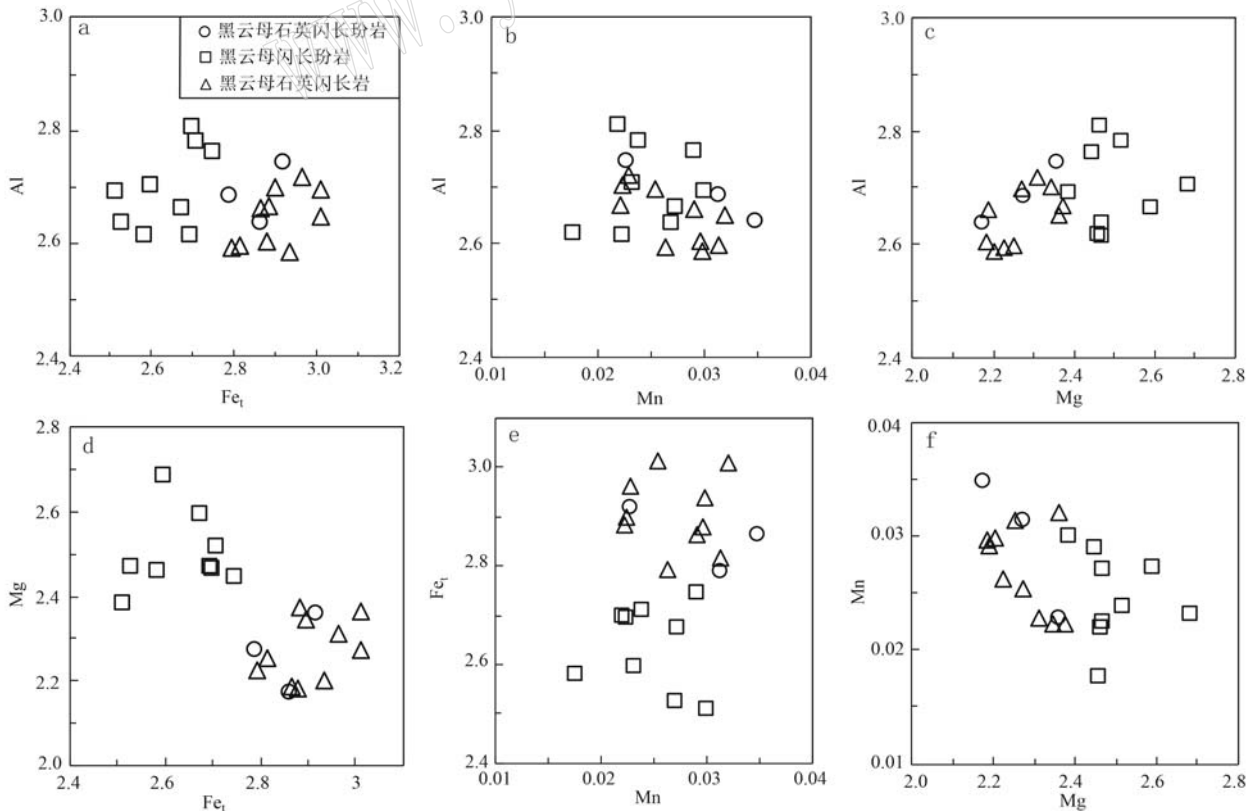


图 5 早子沟金矿黑云母主要阳离子协变图解

Fig. 5 Covariance diagram of main cations of biotite from Zaozigou gold deposit

球化学行为，在不同岩浆体系中形成不同类型的黑云母，其置换方式有 $3 \text{ Mg}^{2+} \leftrightarrow 2 \text{ Al}^{3+}$ 、 $2 \text{ Al}^{3+} \leftrightarrow 3 \text{ Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$ (Abdel-Raham, 1994; 郭耀宇等, 2015)。在岩浆演化的过程中， Mn^{2+} 的浓度较低，一般以类质同像的方式替代 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 进入造岩矿物中(刘英俊等, 1984)。黑云母元素协变图解表明在其结晶过程中 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 之间可能发生置换反应，而 Mg 则被 Mn 以类质同像替代。

5 讨论

5.1 岩浆结晶的物理化学条件

5.1.1 温度与压力

实验研究表明，黑云母中 Ti 含量与温度密切相关，Henry 等(2005)等通过研究建立了一个黑云母温度计的经验公式： $t = \{ [\ln(\text{Ti}) - a - c(X_{\text{Mg}})^3] / b \}^{0.333}$ ，式中： $X_{\text{Mg}} = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}_1)$ ， $a = -2.3594$ ， $b = 4.6482 \times 10^{-9}$ ， $c = -1.7283$ ， $X_{\text{Mg}} = 0.275 \sim 1.000$ ， $\text{Ti} = 0.04 \sim 0.60$ 。其中， Ti 是以 22 个氧原子为基础计算出的黑云母中 Ti 的阳离子数， t 为温度($^{\circ}\text{C}$)。计算获得早子沟金矿脉岩中岩浆黑云母的结晶温度介于 $776.61 \sim 799.69^{\circ}\text{C}$ 之间，平均为 788.92°C 。

Uchida 等(2007)通过研究发现花岗质岩石的固结压力与黑云母全铝含量有很好的正相关性，并建立了黑云母压力计： $p = 303 \text{ Al}^{\text{T}} - 653$ 。其中， p 为压力(MPa)， Al^{T} 为以 22 个氧原子为基础计算出的黑

云母中 Al^{VI} 、 Al^{IV} 的总数。据此估算早子沟金矿脉岩中岩浆黑云母结晶的压力为 $131 \sim 283 \text{ MPa}$ 。侵位深度采用 $p = \rho gh$ 进行换算，其中 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，得出侵位深度 $h = 4.76 \sim 10.29 \text{ km}$ ，平均为 5.75 km 。

5.1.2 氧逸度

氧逸度是影响岩浆作用和成矿过程的另一种重要参数，可以利用花岗岩中与磁铁矿、钾长石共生的黑云母的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{3+} 来大致计算氧逸度(Wones and Eugster, 1965; Wones, 1989)。早子沟金矿脉岩中主要副矿物为磁铁矿，满足应用条件。在黑云母 $\text{Fe}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Fe}^{3+}$ 图解中(图 6a)，早子沟金矿脉岩中的岩浆黑云母落在 NNO 缓冲线附近，靠近 FQM 缓冲线，显示相对较高的氧逸度。在 207 MPa 条件下，基于黑云母稳定性 $[\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})]$ 的 $\lg f_{\text{O}_2} - t$ 图解中(图 6b)，早子沟脉岩中黑云母 $\lg f_{\text{O}_2}$ 大致为 $-14 \sim -12$ ，深成岩(黑云石英闪长岩)氧逸度低于浅成岩。基于 Wones (1989) 提出的氧逸度计算公式，计算出的岩浆黑云母 $\lg f_{\text{O}_2}$ 为 $-14.85 \sim -13.11$ ，平均 -14.10 ，与上述投图结果基本一致。

5.2 岩石成因

利用岩浆岩中黑云母的化学成分变化特征，可以反演推断岩石的来源和形成环境(周作侠, 1988; Zhang *et al.*, 2016; 吴欢欢等, 2019)。造山带钙碱性岩石(I型)中的黑云母相对富镁，过铝质型花岗岩(S型)中的黑云母相对富铝，而非造山型花岗岩

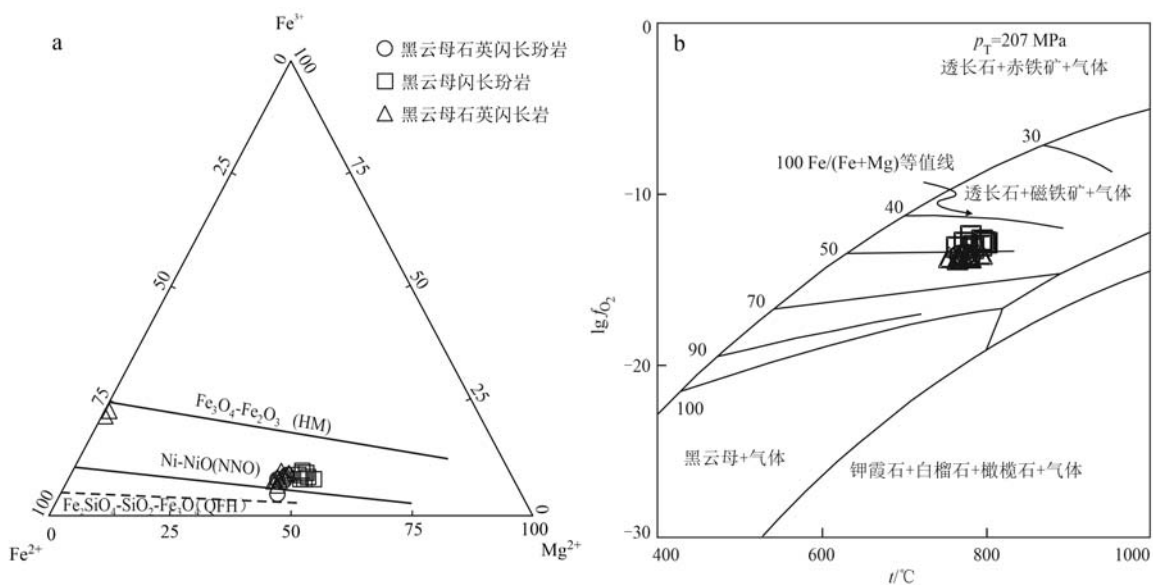


图 6 黑云母氧逸度 $\text{Fe}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Fe}^{3+}$ 图解(a)和 $\lg f_{\text{O}_2} - t$ 图解(b) (据 Wones and Eugster, 1965)

Fig. 6 The biotite diagrams of $\text{Fe}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Fe}^{3+}$ (a) and $\lg f_{\text{O}_2} - t$ (b) from Zaozigou gold deposit (after Wones and Eugster, 1965)

(A型)中的黑云母则明显富铁 (Abdel-Rahman, 1994; Huang *et al.*, 2014)。在黑云母的 $Mg-(Al^{VI}+Fe^{3+}+Ti)-(Fe^{2+}+Mn)$ 分类图解上投点结果表明, 黑云母闪长玢岩黑云母趋向镁质, 黑云母石英闪长岩黑云母趋向铁质, 具有 I、S 过渡特征。黑云母的氧化系数和镁质率 $Mg^{\#}$ 也可作为划分 I 型与 S 型花岗岩的依据, 前者中黑云母具有较高的 $Mg^{\#}$ (0.384~0.626) 及氧化系数 (0.121~0.252), 而后者则较低 (徐克勤等, 1986)。早子沟金矿脉岩中黑云母的氧化系数为 0.10~0.15, 平均值为 0.14, $Mg^{\#}$ 为 0.43~0.51, 平均值为 0.46, 更具有 I 型花岗岩特点。

黑云母中元素含量尤其是 Mg 含量与花岗岩的形成有很大关系: 典型的幔源花岗岩黑云母中 $MgO > 15\%$, 壳源花岗岩黑云母中 $MgO < 6\%$ (丁孝石, 1988)。早子沟金矿脉岩中黑云母 MgO 为 9.54%~13.52%, 平均 10.38%, 应属于壳幔混源物质来源。在黑云母的 $FeO_1/(FeO_1+MgO)-MgO$ 图解上 (周作侠, 1988) (图 7), 早子沟脉岩中的黑云母成分落于壳幔混源区, 并形成较明显的混合趋势线, 反映了该岩体壳幔混源的成因特征。

利用黑云母 FeO 、 MgO 、 Al_2O_3 含量进一步约束其形成的构造环境 (Abdel-Raham, 1994), 在 Al_2O_3-FeO 图解 (图 8a) 中, 样品比较分散, 但均未落入非

造山的碱性岩区域; $MgO-FeO$ 图解 (图 8b)、 F_2-F_1 图解 (图 8c)、 $MgO-FeO-Al_2O_3$ 图解 (图 8d) 均得出较为一致的结果: 早子沟金矿脉岩中黑云母数据绝大多数落入造山带钙碱性区, 与研究区脉岩均属钙碱性 (刘勇等, 2012; 陈国忠等, 2012; 龚全胜等, 2019) 的特征一致。

5.3 成矿指示

西秦岭地区在三叠纪发生了大规模的俯冲造山运动, 为 Au、Cu 等内生金属成矿提供了有利条件 (李康宁等, 2020b), 早子沟脉岩物质来源具有壳幔混源特征。区域上金矿与脉岩具有空间上相伴、时间上相继、物质来源相似等特点, 为同一岩浆-构造旋回演化的产物 (殷勇, 2011)。矿体与脉岩同构造或相邻平行构造产出, 部分脉岩就是矿体, 进一步说明了脉岩与金矿之间可能为协同演化关系 (李康宁等, 2019a)。早子沟金矿脉岩化学成分显示中偏酸性, 但暗色矿物基本全为黑云母, 表明岩浆是在较高的水分压下结晶, 间接反映了深部岩浆源是更加富水的, 这也是矿床形成的有利因素。同位素和流体包裹体研究也表明, 早子沟金矿金矿化与地幔或深部岩浆作用密切相关 (隋吉祥等, 2013; 王涛等, 2018; 李康宁等, 2019b), 更加说明了早子沟金矿与脉岩关系密切, 均为深部壳幔相互作用演化的系列产物。

早子沟脉岩中黑云母的结晶温度约 776.61~799.69℃ (平均 788.92℃), 结晶压力为 131~283 MPa (平均 157 MPa), 对应的成岩深度为 4.76~10.29 km (平均 5.7 km), 氧逸度为 -14.48~-13.11 (平均 -14.10), 说明脉岩形成于相对高温、高氧逸度、低压的环境, 是对金成矿有利的侵入体 (刘诗文, 2015)。黑云母作为层状矿物, Au、Cu、S、Fe 等成矿物质富集其中, 其矿物化学特征对成矿有良好的指示意义 (刘彬等, 2010; 黎敏刚, 2020)。富镁黑云母岩浆岩与 Au、Cu、Mo 成矿作用密切相关, Au 既具化学惰性, 又具化学活性, 在高压下迁移, 低压下沉淀, 高温下迁移, 低温下沉淀; 岩浆源较深, 上升定位较浅, 温度较高的浅部环境有利于金矿化 (陈光远等, 1993; 刘诗文, 2015)。同时 Au 又是亲 Fe 元素, 在岩浆热液矿床形成过程中, 还原条件下 Au 以 Au^0 分散在暗色矿物中, 不进入残余岩浆溶液, 对金矿化不利; 氧化条件下, Au 以离子状态进入残余岩浆溶液, 随硫化物氧化, 富集于熔体相中, 最终进入流体相, 有利于其成矿 (Halter *et al.*, 2005;

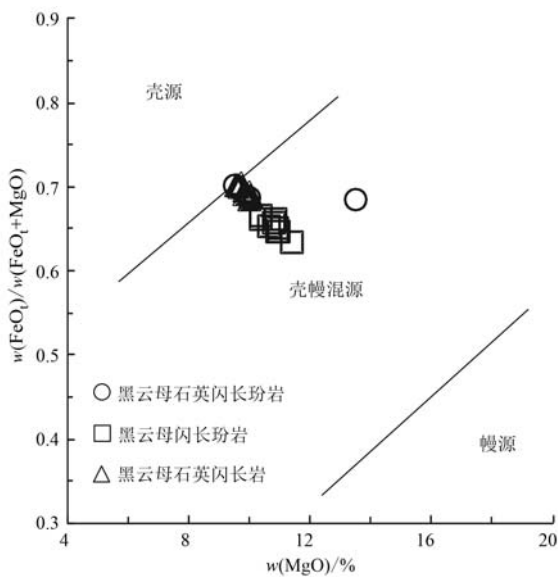


图 7 黑云母源区 $FeO_1/(FeO_1+MgO)-MgO$ 判别图 (据周作侠, 1988)

Fig. 7 $FeO_1/(FeO_1+MgO)-MgO$ discrimination diagram of biotite source (after Zhou Zuoxia, 1988)

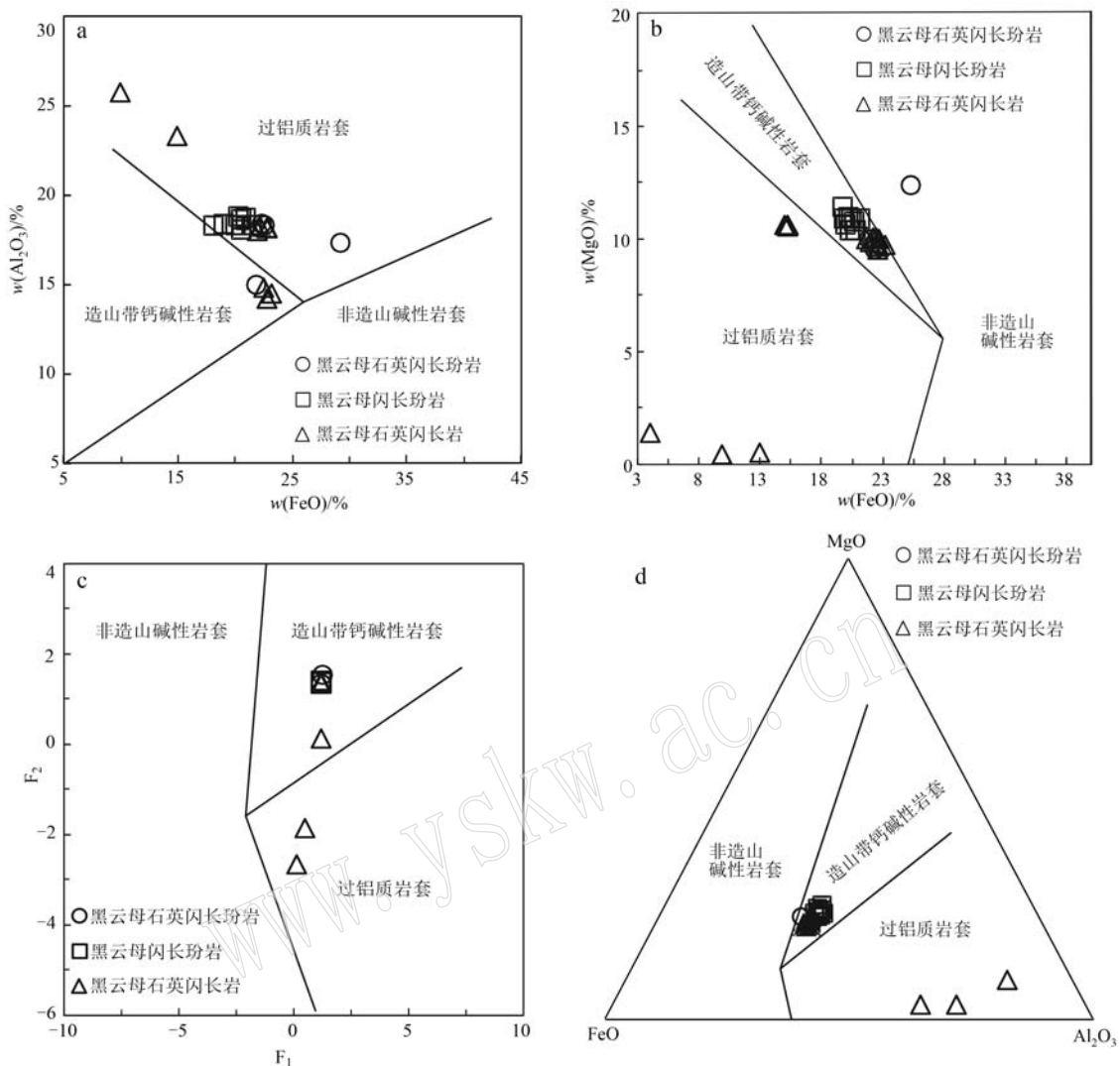


图 8 黑云母构造环境判别图解(据 Abdel-Rahman, 1994)

Fig. 8 Discrimination diagram for tectonic settings of biotite (after Abdel-Rahman, 1994)

$$F_1 = 0.407 \text{ MgO} - 0.239 \text{ FeO}_1 + 0.946 \text{ Al}_2\text{O}_3; F_2 = 1.149 \text{ MgO} + 0.302 \text{ FeO}_1 - 0.173 \text{ Al}_2\text{O}_3$$

蒋少涌等, 2009)。

6 结论

(1) 西秦岭早子沟金矿中黑云母绝大多数为原生岩浆成因的黑云母, Si、Al、Ca 含量较高, Fe、Mg、K 含量较低。黑云母石英闪长玢岩中黑云母趋向镁质黑云母, 黑云母石英闪长岩中黑云母趋向铁质黑云母。

(2) 黑云母的结晶温度为 776.61~799.69℃, 平均为 788.92℃, 结晶压力 131~283 MPa, 侵位深度 4.76~10.29 km, 平均深度为 5.71 km, 具有高温低压、

中深成的特点。

(3) 早子沟金矿中黑云母为壳幔混源型, 形成于造山带钙碱性花岗岩中。矿区中酸性脉岩富含黑云母, 具有较高温度、氧逸度, 加之富水、层状结构的矿物特性, 为金矿化形成的提供了有利条件。

致谢 感谢中国地质调查局发展研究中心程志中研究员、庞振山教授级高级工程师的长期指导, 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朱锐工程师等在野外调研和项目实施过程中提供帮助。

References

- Abdel-Rahman A F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525~541.
- Burkhard D J M. 1991. Temperature and redox path of biotite-bearing intrusives: A method of estimation applied to S- and I-type granites from Australia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(1): 89~98.
- 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 Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Hui'an. 1988. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Press, 555~647(in Chinese with English abstract).
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Zhou Huiruo, *et al.* 1993. Genetic Mineralogy and Gold Mineralization of Guojialing Granodiorite in Jiaodong[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~230(in Chinese with English abstract).
- Chen Guozhong, Liang Zhilu and Wang Jianlong. 2012. Rock geochemical characteristics and geological significance of Zaozigou gold deposit [J]. *Gansu Geology*, 21(4): 23~31(in Chinese with English abstract).
- Chen Guozhong, Wang Jianlong, Liang Zhilu, *et al.* 2013. Analysis of structural characteristics of Zaozigou gold deposit in Gannan [J]. *Gansu Geology*, 22(4): 50~57(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 Zaozigou Gold Deposit of Xiahe-Hezuo Area in West Qinling[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 1~86(in Chinese with English abstract).
- Ding Xiaoshi. 1988. Typomorphic characteristics and geological significance of biotite minerals in various granites in central and southern Tibet[J]. *Journal of Institute of Deposit Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, (1): 33~50(in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. US Government Printing Office, 354B: 1~49.
- Gong Quansheng, Dai Wenjun and Wu Xuemei. 2019. Discussion on geochemical characteristics and genetic mechanism of ore bearing rock mass of Zaozigou gold deposit in West Qinling[J]. *Mineral Exploration*, 10(4): 854~862(in Chinese with English abstract).
- Guo Yaoyu, He Wenyan, Li Zaichun, *et al.* 2015. Petrogenesis of geluohu granodiorite porphyry in West Qinling: Constraints of biotite mineralogical characteristics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3 380~3 390(in Chinese with English abstract).
- Halter W E, Heinrich A C and Pettke T. 2005. Magma evolution and the formation of porphyry Cu-Au ore fluids: Evidence from silicate and sulfide melt inclusions [J]. *Mineralium Deposita*, 39(8): 845~863.
- Henry D J, Guidotti C V and Thomson J A. 2005. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 90(2~3): 316~328.
- Huang H, Zhang Z C, Santosh M, *et al.* 2014. Geochronology, geochemistry and metallogenic implications of the Bozigou rare metal-bearing peralkaline granitic intrusion in South Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 61: 157~174.
- 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).
- Jiang Shaoyong, Dai Baozhang, Jiang Yaohui, *et al.* 2009. Jiaodong and Xiaolinling: Orogenic gold provinces in two different tectonic environments[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2 727~2 738(in Chinese with English abstract).
- Jin X Y, Li J W, Hofstra A H, *et al.* 2017. Magmatic-hydrothermal origin of the early Triassic Laodou lode gold deposit in the Xiahe-Hezuo district, West Qinling orogen, China: Implications for gold metallogeny[J]. *Mineralium Deposita*, 52: 883~902.
- Li Kangning, Jia Ruya, Li Hongrui, *et al.* 2020a. Gold copper polymetallic metallogenic system and prospecting prediction related to intermediate acid intrusive rocks in Xiahe-Hezuo area, Gansu Province, West Qinling[J]. *Geological Bulletin*, 50(8): 1 191~1 203(in Chinese with English abstract).
- Li Kangning, Li Hongrui, Jia Ruya, *et al.* 2019b. Construction of "Trinity" prospecting prediction geological model of Zaozigou gold deposit in Gansu[J]. *Mineral Exploration*, 10(6): 1 397~1 408(in Chinese with English abstract).

- Li Kangning, Li Hongrui, Liu Bochong. *et al.* 2019a. Geochemical characteristics of TTG dick rock and the relation with gold mineralization in West Qinling Mountain[J]. *Science Technology*, 19(12): 52~62(in Chinese with English abstract).
- Li Kangning, Liu Bochong and Di Yongjun. 2020b. Triassic oceanic subduction in northwestern West Qinling Mountain: Evidence from MA/HMA[J]. *Geology in China*, 47(3): 22~37(in Chinese with English abstract).
- Li Pengbing. 2020. Wall rock alteration, mineralization zoning and metallogenic epoch division of Zaozigou gold deposit in Gansu Province [J]. *World Nonferrous Metals*, (9): 91~92(in Chinese with English abstract).
- Li Mingang. 2020. Biotite Marks the Relationship Between Granite and Gold Mineralization-Example for North China Gold Deposit [D]. Beijing: China University of Geosciences, 1~124(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, West Qinling[J]. *Geotectonics and Metallogeny*, 40(2): 354~366(in Chinese with English abstract).
- Lin Wenwei and Peng Lijun. 1994. Estimation of Fe³⁺ and Fe²⁺ in amphibole and biotite from electron microprobe analysis data[J]. *Journal of Changchun Institute of Geosciences*, 24(2): 155~162(in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Ma Changqian, Liu Yuanyuan, *et al.* 2010. Chemical characteristics of biotite minerals in Tongshankou copper(molybdenum) deposit in Southeast Hubei and its indication to petrogenesis and mineralization [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(2): 151~165(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 Shiwen. 2015. Identification of Magmatic Biotite to Mineralization [D]. Beijing: China University of Geosciences, 1~174(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, *et al.* 1984. Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 77~78(in Chinese).
- 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).
- Lu Yuanfa. 2004. Geokit: A geochemical tool package constructed by VBA[J]. *Geochemistry*, 33(5): 459~464(in Chinese with English abstract).
- Lü Xinbiao, Cao Xiaofeng, Mohamed L S S, *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).
- Nacht H, Ibhi A, Abia E H, *et al.* 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neofomed biotites [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(16): 1415~1420.
- Santosh K and Manjari P. 2010. Mineralogy and geochemistry of biotites from Proterozoic granitoids of western Arunachal Himalaya: Evidence of bimodal granitogeny and tectonic affinity[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 75(5): 715~730.
- Stone D. 2000. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens river area, northwest superior province, Ontario, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 38: 455~470.
- Sui Jixiang and Li Jianwei. 2013. Metallogenic age and genesis of Zaozigou gold deposit in Xiahe-Hezuo area, West Qinling[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(S2): 346~347(in Chinese with English abstract).
- 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: 1230~1244.
- Uchida E, Endo S and Makino M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Resource Geology*, 57(1): 47~56.
- 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).
- Wones D R. 1989. Significance of the assemblage titanite+magnetite+quartz in granitic rocks[J]. *American Mineralogist*, 74(7~8): 744~749.
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite; Experiment, theory,

- and application[J]. *The American Mineralogist*, 50: 1 228~1 272.
- Wu Huanhuan, Wang Tao, Zhang Zhaochong, *et al.* 2019. Chemical characteristics of amphibole and biotite from the Boziguo'er alkaline granitic pluton in Baicheng County, Xinjiang, and their implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(2): 173~190(in Chinese with English abstract).
- Xu Keqin and Tu Guangchi. 1986. Relationship Between Granite Geology and Mineralization[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1~645(in Chinese with English abstract).
- Yin Yong. 2011. Relationship between vein rocks and gold mineralization in West Qinling area[J]. *Gansu Geology*, 20(1): 28~37(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin and Yao Anping. 2004. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23~32(in Chinese with English abstract).
- Zhang W, Lentz D R, Thorne K G, *et al.* 2016. Geochemical characteristics of biotite from felsic intrusive rocks around the Sisson Brook W-Mo-Cu deposit, west-central New Brunswick: An indicator of halogen and oxygen fugacity of magmatic systems[J]. *Ore Geology Reviews*, 77: 82~96.
- Zhang Youjun, Liang Wentian, Luo Xianrong, *et al.* 2015. Geochemical characteristics and diagenetic significance of biotite of guangtoushan rock group in Qinling orogenic belt[J]. *Minerals and Rocks*, 35(1): 100~108(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).
- Zhou Zuoxia. 1988. Chemical composition characteristics of mafic mica in intrusive rocks and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 4(3): 63~73(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuoxia. 1991. Application of chemical composition, trace elements, REE, Cu, Cl and F of Mg-Fe mica in identifying rock genetic types [A]. Wu Liren and Li Binglun. Two Types of Mesozoic Porphyry Deposits in Eastern China[C]. Beijing: Science Press, 76~82(in Chinese with English abstract).
- 1 039~1 054.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1988. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 555~647.
- 陈光远, 孙岱生, 周珣若, 等. 1993. 胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~230.
- 陈国忠, 梁志录, 王建龙. 2012. 早子沟金矿岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *甘肃地质*, 21(4): 23~31.
- 陈国忠, 王建龙, 梁志录, 等. 2013. 甘南枣子沟金矿构造特征分析[J]. *甘肃地质*, 22(4): 50~57.
- 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.
- 丁孝石. 1988. 西藏中南部各类花岗岩中黑云母矿物标型特征及其地质意义[J]. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, (1): 33~50.
- 郭耀宇, 和文言, 李在春, 等. 2015. 西秦岭格尔括合花岗闪长斑岩岩石成因: 黑云母矿物学特征约束[J]. *岩石学报*, 31(11): 3 380~3 390.
- 龚全胜, 代文军, 武雪梅. 2019. 西秦岭早子沟金矿含矿岩体地球化学特征及成因机制探讨[J]. *矿产勘查*, 10(4): 854~862.
- 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.
- 蒋少涌, 戴宝章, 姜耀辉, 等. 2009. 胶东和小秦岭: 两类不同构造环境中的造山型金矿省[J]. *岩石学报*, 25(11): 2 727~2 738.
- 李康宁, 贾儒雅, 李鸿睿, 等. 2020a. 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): 1 191~1 203.
- 李康宁, 李鸿睿, 刘伯崇, 等. 2019a. 西秦岭 TTG 质脉岩地球化学特征及其与金矿化的关系[J]. *科学技术与工程*, 19(12): 52~62.
- 李康宁, 李鸿睿, 贾儒雅, 等. 2019b. 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.
- 李康宁, 刘伯崇, 狄永军. 2020b. 三叠纪西秦岭西北部洋俯冲的记录: 来自镁安山岩/高镁安山岩的证据[J]. *中国地质*, 47(3): 350~365.
- 李鹏兵. 2020. 甘肃早子沟金矿围岩蚀变、矿化分带及成矿期次划分[J]. *世界有色金属*, (9): 91~92.
- 黎敏刚. 2020. 黑云母对花岗岩与金成矿关系的标识——以华北金矿区为例[D]. 北京: 中国地质大学, 1~124.
- 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.
- 林文蔚, 彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的

附中文参考文献

- 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):

- Fe³⁺、Fe²⁺[J]. 长春地质学院学报, 24(2): 155~162.
- 刘彬, 马昌前, 刘园园, 等. 2010. 鄂东南铜山口铜(钼)矿床黑云母矿物化学特征及其对岩石成因与成矿的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 29(2): 151~165.
- 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.
- 刘诗文. 2015. 岩浆成因黑云母对成矿作用的标识[D]. 北京: 中国地质大学, 1~174.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 1984. 元素地球化学[D]. 北京: 科学出版社, 77~78.
- 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.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5): 459~464.
- 吕新彪, 曹晓峰, Mohamed L S 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.
- 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.
- 吴欢欢, 王涛, 张招崇, 等. 2019. 新疆拜城县波孜果尔碱性花岗岩体中角闪石与黑云母地球化学特征及其对成岩成矿的记录[J]. 岩石矿物学杂志, 38(2): 173~190.
- 徐克勤, 涂光焯. 1986. 花岗岩地质和成矿关系[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1~645.
- 殷勇. 2011. 西秦岭地区脉岩与金矿化的关系[J]. 甘肃地质, 20(1): 28~37.
- 张有军, 梁文天, 罗先熔, 等. 2015. 秦岭造山带光头山岩体群黑云母地球化学特征及成岩意义[J]. 矿物岩石, 35(1): 100~108.
- 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]. 地学前缘, 11(3): 23~32.
- 赵积珍, 陈国忠, 梁志录, 等. 2013. 早子沟金矿矿体及地球化学特征[J]. 甘肃地质, 22(2): 38~43.
- 周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 4(3): 63~73.
- 周作侠. 1991. Mg-Fe云母的化学成分、微量元素、REE、Cu、Cl、F等在识别岩石成因类型上的应用[A]. 吴利仁, 李秉伦. 中国东部中生代两类斑岩型矿床[C]. 北京: 科学出版社, 76~82.