

文章编号: 0258-7106 (2021) 03-0491-18

Doi: 10.16111/j.0258-7106.2021.03.006

陕西商南三官庙金矿床地质特征、金的赋存状态及矿床成因探讨^{*}

汪超^{1,2,3}, 王瑞廷^{1,3,4**}, 刘云华¹, 薛玉山^{2,3}, 胡西顺^{2,3}, 牛亮^{2,3}

(1 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054; 2 西安西北有色地质研究院有限公司, 陕西西安 710054; 3 陕西省矿产资源综合利用工程技术研究中心, 陕西西安 710054; 4 西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西西安 710054)

摘要 文章在野外地质勘查、研究的基础上, 系统介绍了三官庙金矿床基本地质特征。通过系统的光学显微镜、扫描电镜观察, 将三官庙金矿床热液期成矿阶段划分为成矿早阶段(S1)、主阶段(S2)和晚阶段(S3), 主阶段形成大量硫化物及方解石石英脉(团块), 并形成金矿化; 载金硫化物主要为毒砂、黄铁矿, 均为同一世代, 形成环境条件稳定, 总体与金同时生成。利用电子探针(EPMA)对载金硫化物进行分析, 结合元素面扫描成像, 认为三官庙金矿石中“不可见金”普遍分布于黄铁矿、毒砂等硫化物中, 在黄铁矿中主要以超显微包裹的纳米金形式存在, 在毒砂中以固溶体金形式存在。三官庙金矿床热液黄铁矿电子探针(EPMA)分析具有较高的Co/Ni比值, 在As-Co-Ni微量元素图解中位于岩浆热液区, 这些特征指示黄铁矿为岩浆热液成因; 依据金矿石、围岩、钠长角砾岩全岩稀土元素数据, 认为三官庙金矿床矿石显示了对钠长角砾岩稀土元素特征的继承演化, 说明二者之间具有成因联系; Au/Ag比值、热液硫化物共生组合、毒砂标型特征等表明三官庙金矿床成矿阶段流体性质为碱性, 氧逸度 $\log f(O_2) < -28.5$ 、硫逸度 $\log f(S_2)$ 平均-8.4, 毒砂温度计算成矿温度约350℃。综合地质、地球化学特征认为, 三官庙金矿床成因类型为与钠长岩相关的受断裂构造控制的岩浆热液型金矿床。

关键词 地球化学; 电子探针分析; 金的赋存状态; 矿床成因; 三官庙金矿床

中图分类号:P618.51

文献标志码:A

Geological characteristics, modes of occurrence of gold and genesis of San' guanmiao gold deposit, Shangnan, Shaanxi Province

WANG Chao^{1,2,3}, WANG RuiTing^{1,3,4}, LIU YunHua¹, XUE YuShan^{2,3}, HU XiShun^{2,3} and NIU Liang^{2,3}

(1 School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Xi'an Northwest Geology Research Institute of Nonferrous Metals Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 Shaanxi Engineering Technology Research Center of Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4 Northwest Nonferrous Geological and Mining Group Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

Based on field geological exploration and research, this paper systematically describes the basic geological characteristics of the San' guanmiao gold deposit. According to the systematic observation with optical microscope and scanning electron microscope (SEM), the hydrothermal metallogenetic stage of the San' guanmiao gold deposit is divided into pre-ore stage (S1), main-ore stage (S2) and post-ore stage (S3). Massive sulfide and calcite quartz veins were formed in the main stage with gold mineralization. The gold-bearing sulfides are mainly

* 本文得到中国地质调查局“矿集区矿产调查和深部找矿预测”项目(编号: DD2019057018)、陕西省地勘基金项目(编号: 61201707317)和国家自然科学基金面上项目(编号: 41872219)联合资助

第一作者简介 汪超,男,1987年生,硕士研究生,高级工程师,主要从事地质勘查、研究与管理工作。Email: wangchaogeo@qq.com

** 通讯作者 王瑞廷,男,1969年生,博士,教授级高工,博士生导师,主要从事矿产地质与勘查技术综合研究工作。Email: wrtyf@163.com

收稿日期 2020-07-09; 改回日期 2021-04-22。秦思婷编辑。

arsenopyrite and pyrite, which are of the same paragenesis and were formed under stable environmental conditions and at the same time as gold. Based on the electron probe micro analysis (EPMA) results of gold-bearing sulfides and the scanning images, the authors hold that "invisible gold" in the San' guanmiao gold deposit is widely distributed in pyrite, arsenopyrite and other sulfides, "invisible gold" mainly exists as nanoparticles in pyrite, and there exists solid solution in arsenopyrite. The hydrothermal pyrite in the San' guanmiao gold deposit has a high Co/Ni value and is located in the magmatic hydrothermal region on the ternary diagram of As-Co-Ni. It is indicated that pyrite is of magmatic hydrothermal origin. Based on REE concentrations of ores, albite-breccias and wall rocks of the San' guanmiao gold deposit, it is considered that the ore shows the inheritance and evolution from albite-breccia and, meanwhile, indicates the genetic relationship between the deposit and albite-breccia. According to the Au/Ag value, hydrothermal sulfide association combination, and typomorphic characteristics of arsenopyrite, the authors consider that the fluid properties of the main metallogenetic stage are alkaline, oxygen fugacity $\log f(O_2) < -28.5$, and average of sulfur fugacity $\log f(S_2) = -8.4$. The mineralization temperature calculated with the arsenopyrite thermometry is about 350°C. Based on the comprehensive geological and geochemical characteristics, the authors have reached the conclusion that the San' guanmiao gold deposit is a magmatic hydrothermal deposit, which is controlled by fault structures and genetically related to albite(-breccia).

Key words: geochemistry, electron probe micro analysis (EPMA), modes of occurrence of gold, genesis, San' guanmiao gold deposit

矿床矿石特征如成分、矿物组成、结构构造等是研究矿床成因的基础(范宏瑞等,2018)。稀土元素特征可以示踪成矿流体来源(陈德潜等,1990)。毒砂、黄铁矿等金属硫化物是热液金矿床的重要载金矿物,其成分、结构构造等特征能够探讨成矿元素的迁移、富集规律,指示成矿物理化学条件,估算成矿温度(Kretschmar et al., 1976; Sharp et al., 1985; Kerr et al., 1999; Lee et al., 2019)。硫化物内某些微量特征,可用来指示硫化物来源,进而探讨矿床成因(Lentz, 2002; Makoundi et al., 2014; 李广文等,2018; 顾雪祥等,2019)。研究金矿床中金的赋存状态对选矿工艺的确定具有重要意义。金矿床中“不可见”金的赋存状态,前人已进行了大量研究(Simon et al., 1999; Reich et al., 2005; Deditius et al., 2014),许多学者利用电子探针分析载金硫化物中金的赋存状态(陈翠华等,2013; 周天成等,2015; 郑禄林等,2017)。

三官庙金矿床位于陕西省商南县,已达中型规模,为该县唯一开发投产的金矿山。该矿床研究程度总体较低,已有研究多集中在地质特征、成矿规律及找矿方向等方面(靳小鹏等,2014; 汪超等,2016; 2017)。本次研究划分了成矿阶段;通过扫描电镜、光学显微镜观察,结合电子探针测试,详细研究了载金矿物特征及金的赋存状态;利用稀土元素、微量元素、矿物标型特征等地球化学证据,对矿床成因、成

矿作用进行了探讨,进一步补充、深化了对三官庙金矿床的相关认识。

1 区域地质背景

三官庙金矿床处于秦岭造山带南秦岭北部逆冲推覆构造带内。区域地层由北向南主要包括中泥盆统池沟组,上泥盆统一下石炭统九里坪组,青白口系耀岭河组,太古界—古元古界陡岭岩群等(图 1a,b)。陡岭岩群为本区基底岩石,岩性主要为斜长角闪片麻岩,经历了多期变形变质;耀岭河组原岩含有基性火山岩成分,具有相对较高的金丰度,同时经历了较强的变形变质作用,为本区金的主要矿质来源之一(梁文艺,1996; 胡西顺,2001)。

南秦岭成矿带内沿镇安-板岩镇断裂两侧,大、中型金矿床成带、集中分布(胡西顺等,2015)。三官庙金矿床即产于镇安-板岩镇主断裂(F_2)及其南分支断裂(F_4)夹持的构造透镜体中,矿床宏观产出位置明显受该主断裂及其分支断裂控制,镇安-板岩镇断裂为矿床控矿构造,为本区金的成矿提供了优越的构造背景条件。在镇安-板岩镇断裂的旁侧,广泛发育次级断裂、平行断裂,为成矿作用提供了热液运移的通道及矿质富集场所。

区域岩浆岩较发育,受区域性断裂-岩浆活动带的控制,呈东西向展布,主要包括晋宁期豆腐尖糜棱

岩化花岗闪长岩和钠长(角砾)岩。钠长(角砾)岩包括岩浆成因的钠长岩和隐爆成因的钠长角砾岩2种岩石类型,野外踏勘所见以后者为主;产状以脉状、小岩枝状为主,可单独由其中一种岩石类型组成,也可由位于核部的钠长岩和环绕其分布的钠长角砾岩组成(李勇等,1999;汪超等,2017),一般认为秦岭地区钠长(角砾)岩形成时代为印支期(刘冲昊,2016;胡西顺等,2019)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

青白口系耀岭河组第三岩性段为矿区赋矿地层,区内呈东西向展布,岩性以灰色-灰黑色碳质绢云千枚岩为主,夹有灰绿色钠长绿泥片岩、绿泥阳起片岩;上述变质岩石原岩主要为碳质泥岩、夹少量基性火山岩(苏春乾等,2006)。结合野外调查及探矿工程编录,矿体近矿围岩岩性以含黄铁矿碳质绢云千枚岩为主,次为钠长绿泥片岩。

赋矿地层中普遍发育镇安-板岩带断裂的1组次级层间断裂,顺层或以小角度斜切地层面理,具压

扭-走滑断层性质,总体产状 $25^{\circ}\angle 70^{\circ}$,为区内金矿体的容矿构造,其内充填物主要有钠长石方解石石英脉、围岩地层角砾和断层泥3类。在金矿化蚀变作用强烈部位,断裂内及上、下盘地层中发育钠长石化、硅化、毒砂化、黄铁矿化等围岩蚀变;受强热液蚀变交代-充填作用改造,局部断裂特征不明显,但在矿体尖灭部位,可观察到明显的断裂构造特征。

矿区内钠长(角砾)岩主要分布在矿体周边、镇安-板岩带断裂带(F2)两侧(图2a)。断裂以北为一岩枝;断裂南侧耀岭河组第三岩性段地层中钠长(角砾)岩主要位于三官庙金矿体东、西延伸地段,大致顺地层面理呈脉状产出。三官庙金矿床矿石具强烈钠长石化,汪超等(2016;2017a)基于矿床地质、矿石宏、微观特征,论述了三官庙金矿床与区内钠长(角砾)岩的密切成因联系。

2.2 矿体地质

矿区内共圈定出南、北2条矿化蚀变带。北矿化蚀变带位于段家沟-碾子沟一带,总长约700 m,宽约100 m,走向NNW;带中发育多条层间断裂,断裂总体产状 $25^{\circ}\angle 70^{\circ}$,部分断裂中发育较强金矿化及围

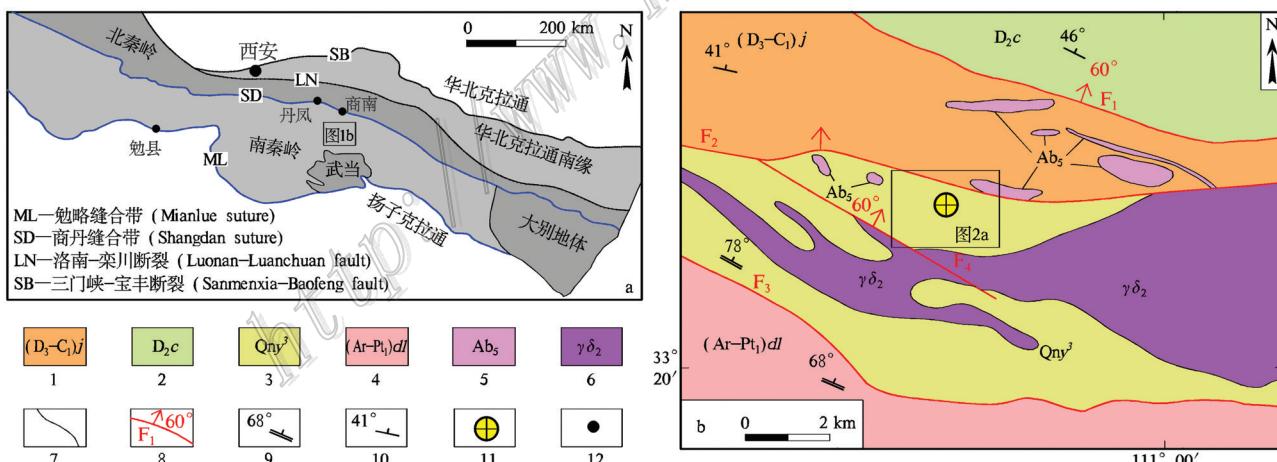


图1 秦岭造山带地质单元简图(a,修编自Wang et al., 2016)和三官庙金矿床区域地质图(b)
1—上泥盆统一下石炭统九里坪组片岩、千枚岩、大理岩;2—中泥盆统池沟组板岩、千枚岩;3—青白口系耀岭河组第三岩性段千枚岩、片岩;
4—太古界—古元古界陡岭岩群片麻岩、斜长角闪片岩;5—钠长(角砾)岩;6—糜棱岩化花岗闪长岩;7—地质界线;8—断裂及其编号、产状;
9—片理产状;10—地层产状;11—三官庙金矿床;12—城市

Fig.1 Major geological units of Qinling orogenic belt(a, modified after Wang et al., 2016) and geological map of the San'guanmiao ore district(b)

1—Upper Devonian—Lower Carboniferous Jiuliping Formation: Schist, phyllite and marble; 2—Middle Devonian Chigou Formation: Slate and phyllite; 3—Third member of Yaolinghe Formation, Qingbaikou System: Phyllite and schist; 4—Archean-Early Proterozoic Douling Group: Gneiss and hornblende schist; 5—Albite (breccia) rock; 6—Mylonitized granodiorite; 7—Geological boundary; 8—Fault and its serial number and attitude;
9—Attitude of schistosity; 10—Attitude of stratum; 11—San'guanmiao gold deposit; 12—City

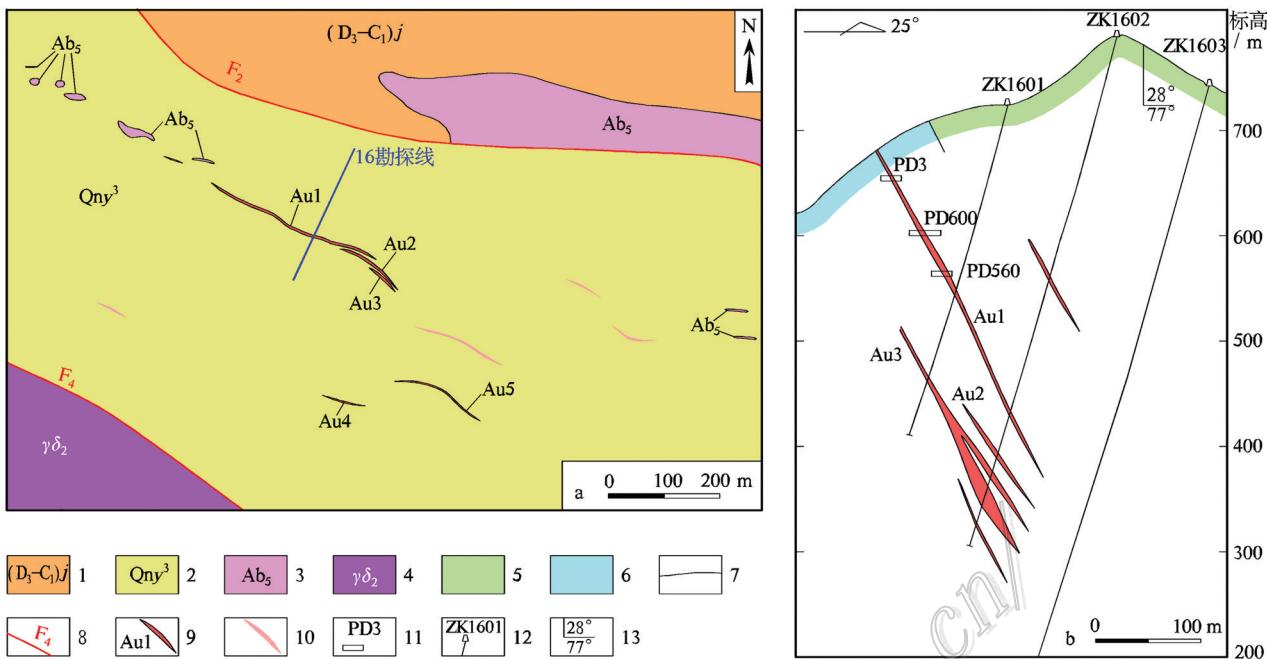


图2 三官庙金矿床矿区地质简图(a)及16号勘探线剖面示意图(b)

1—上泥盆统一下石炭统九里坪组片岩、千枚岩、大理岩;2—青白口系耀岭河组第三岩性段千枚岩、片岩;3—钠长(角砾)岩;4—糜棱岩化花岗闪长岩;5—千枚岩;6—片岩;7—地质界线;8—断裂及编号;9—金矿体及编号;10—金矿化体;11—坑道位置及编号;12—钻孔位置及编号;13—地层产状

Fig. 2 Geological map of the San' guanmiao gold deposit (a) and geological section along No. 16 exploration line (b)

1—Upper Devonian—Lower Carboniferous Jiuliping Formation: Schist, phyllite and marble; 2—Third member of Yaolinghe Formation, Qingbaikou System: phyllite and schist; 3—Albite (breccia) rock; 4—Mylonitized granodiorite; 5—Phyllite; 6—Schist; 7—Geological boundary; 8—Fault and its serial number; 9—Gold orebody and its serial number; 10—Gold mineralized body; 11—Tunnel and its serial number; 12—Drill hole and its serial number; 13—Attitude of stratum

岩蚀变;由北至南圈出3条金主矿体(Au1、Au2、Au3),呈NWW-SEE向近平行展布;Au1矿体规模最大,Au3次之。南矿化蚀变带位于北矿化蚀变带南500 m处,天池沟-姜家台一带,长约500 m,宽50~150 m不等;带中发育多条层间断裂,发育较强围岩蚀变,但金矿化较北带弱;在其中圈出Au4、Au5等小矿体(图2a)。

Au1矿体控制矿体长度830 m,矿体地表出露最低标高649 m,最高726 m,矿体控制最低标高342 m,控制最大斜深365 m。单工程矿体厚度0.67~4.41 m,矿体平均厚度1.56 m;单工程Au品位1.02×10⁻⁶~9.91×10⁻⁶,平均品位3.42×10⁻⁶。矿体呈脉状产出,具分支复合、膨大收缩现象。矿体倾向19°~55°、倾角40°~85°。

Au3矿体控制矿体长度310 m,出露最低标高621 m,最高669 m,矿体控制最低标高214 m,控制斜深460 m。单工程矿体厚度0.81~3.63 m,矿体平

均厚度2.12 m;单工程Au品位1.13×10⁻⁶~5.33×10⁻⁶,平均品位3.29×10⁻⁶。矿体呈脉状产出,具分支复合、膨大收缩现象。矿体产状22°~40°∠63°~82°(图2b)。

2.3 矿石特征

2.3.1 矿石组分及结构构造

矿石为含硫化物、石英脉的钠长石化蚀变岩。金属矿物主要为毒砂、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、钛铁矿、闪锌矿等,占全部矿物的5%~10%,非金属矿物主要为钠长石、石英、方解石、黑云母、白云母、绿泥石及白云石等,占全部矿物的90%~95%。

矿石中各项化学组分含量较稳定,以高w(SiO₂)、w(Al₂O₃)、w(TFe₃)、w(CaO)、w(Na₂O)为特征,这与显微镜下矿石矿物组成鉴定结论一致(表1)。矿石Au/Ag=5.59~14.78,平均9.46(表2)。

矿石结构主要为他形-半自形-自形结构、粒状结构及碎裂结构。矿石构造主要脉状构造、细脉状构造、团块状构造、条带状构造、星点状构造。

表1 三官庙金矿石化学组成(据汪超等,2017b)

Table 1 Chemical composition of the ores from the San'guanmiao gold deposit (after Wang et al., 2017b)

对比项目	$w(\text{Au})/10^{-6}$	$w(\text{B})/\%$													
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	CaO	SO_3	K_2O	MgO	MnO	As_2O_3	P_2O_5	TiO_2	ZrO_2	Cl
最小	1.02	55.46	11.80	9.59	4.33	2.59	0.51	0.27	0.51	0.15	0.01	0.12	0.51	0.07	0.01
最大	10.70	65.70	14.77	14.89	6.97	7.15	3.64	1.69	1.03	0.32	0.80	0.22	0.81	0.12	0.10
中值	3.88	57.54	13.39	11.44	6.22	4.88	1.40	1.21	0.72	0.27	0.26	0.15	0.66	0.10	0.03
算数平均	4.47	58.69	13.36	11.96	6.19	4.72	1.58	1.12	0.74	0.25	0.33	0.16	0.65	0.10	0.03
几何平均	3.67	58.62	13.32	11.84	6.14	4.50	1.37	0.96	0.72	0.25	0.21	0.16	0.65	0.09	0.03

表2 三官庙金矿金矿物及矿石Au/Ag特征

Table 2 Gold and silver mass ratio in gold minerals and ores from the San'guanmiao gold deposit

对比项目	金矿物(据汪超等,2017a)				矿石(据汪超等,2017b)										
	1	2	3	平均	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9	GP10	平均
$w(\text{Au})/10^{-6}$	92.14	92.35	92.78	92.42	3440	2230	1020	6070	1720	3670	4080	10700	6820	4930	4468
$w(\text{Ag})/10^{-6}$	7.86	7.65	7.22	7.58	259	340	166	1086	307	457	357	724	477	557	473
Au/Ag	11.72	12.07	12.85	12.21	13.28	6.56	6.14	5.59	5.60	8.03	11.43	14.78	14.30	8.85	9.46

2.3.2 成矿阶段划分

根据三官庙金矿石野外地质特征、脉体(矿物)穿切关系、矿物组合等特征,将三官庙金矿床热液成矿期划分为3个阶段(图3a,b,图4):

成矿早阶段(S1) 非金属矿物沿主断裂构造交代上下盘围岩(局部充填),形成致密的石英钠长石化岩,与围岩渐变过渡,形成矿石的雏形(图3,图5a~c)。该阶段占总矿石体积分数约80%,矿物主要

为钠长石约60%(占矿石总比例,下同),石英约5%~10%,黑云母、白云母约5%~10%,方解石约5%(图4,图6a~c)。这一阶段形成的非金属矿物总体相互接触、紧密连生,部分黑云母、白云母呈填隙状分布于钠长石等矿物粒间。

成矿主阶段(S2) 交代、蚀变成矿早阶段的钠长石化岩,形成大量交代成因的方解石石英脉(不规则团块)(图3,图5a~c);同时,大量硫化物蚀变钠长石

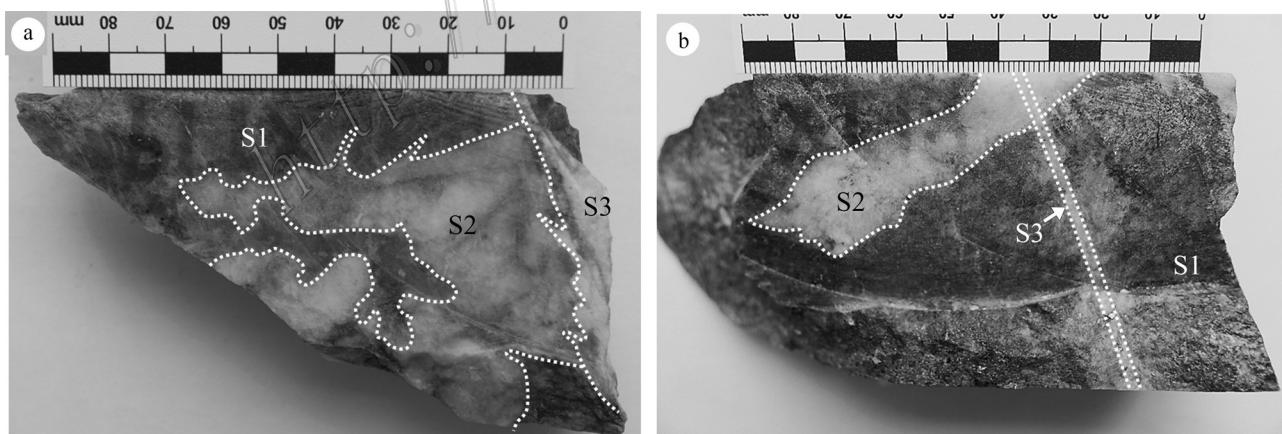


图3 三官庙金矿石岩芯特征

a、b. 钠长石化岩(S1)被方解石石英脉或团块(S2)交代,二者被方解石石英细脉切穿(S3)

S1—成矿早阶段; S2—成矿主阶段; S3—成矿晚阶段

Fig. 3 Diamond drill core samples showing the vein paragenesis of the San'guanmiao gold ores

a, b. Albitic rocks (S1) replaced by calcite-quartz veins or masses (S2), both of which are cut through by calcite-quartz veinlets (S3)

S1—Pre-ore stage; S2—Main-ore stage; S3—Post-ore stage

矿物	热液期			表生期
	成矿早阶段	成矿主阶段	成矿晚阶段	
非金属矿物				
钠长石	●	●	●	
石英	●	●	●	
方解石	●	●	●	
黑云母	—			
白云母	—			
金属矿物				
黄铁矿	星点状 细脉状	●	—	
毒砂	星点状 条带/团块	●		
磁黄铁矿		—		
黄铜矿		—		
闪锌矿		—		
钛铁矿		—		
金		—		
表生矿物				
绿泥石			—	
褐铁矿			—	

图4 三官庙金矿床矿物生成顺序

Fig. 4 Mineral paragenesis in the San'guanmiao gold deposit

化岩,以毒砂、黄铁矿为主,少量磁黄铁矿、黄铜矿、

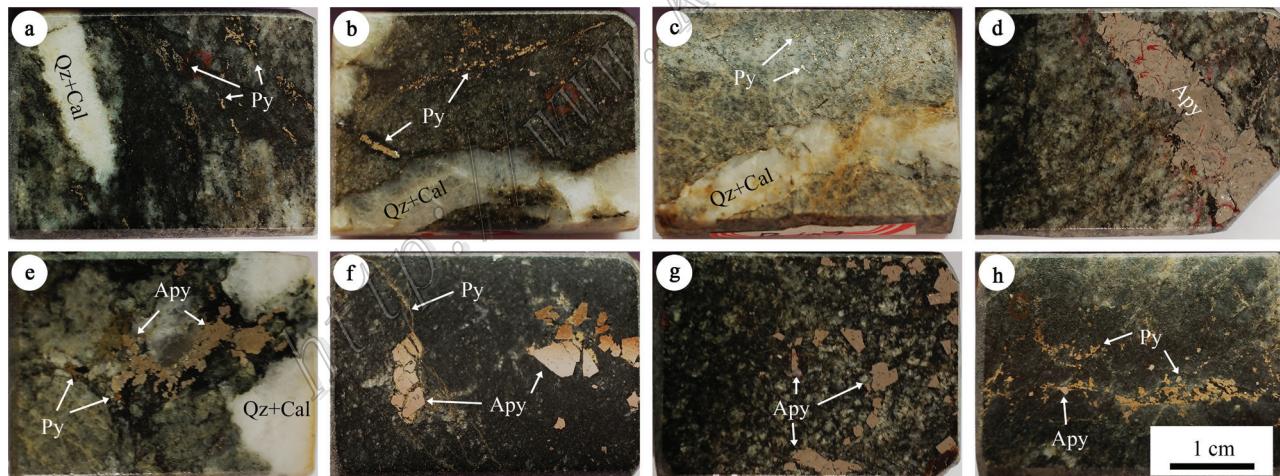


图5 三官庙金矿石(光片)宏观特征

a~c. 钠长石化岩中的交代方解石石英脉, 黄铁矿呈(断续)细脉状、星点状;d. 毒砂呈脉状穿插于钠长石化岩中;e. 毒砂呈团块状分布于交代方解石石英脉边部,与星点状黄铁矿共生;f. 毒砂呈星点状、团块状分布于钠长石化岩中,黄铁矿部分与毒砂共生、部分呈细脉状切穿毒砂颗粒;

g. 毒砂呈星点状分布于钠长石化岩中;h. 毒砂呈团块状、条带状与星点状黄铁矿共生

Qz—石英; Cal—方解石; Py—黄铁矿; Apy—毒砂

Fig. 5 Macroscopic characteristics of San'guanmiao gold ores (polished section)

a~c. Albitized rock with metasomatic calcite-quartz veins, pyrite veinlets (some are intermittent) and disseminated pyrites; d. Albitized rock cut through by arsenopyrite vein; e. Arsenopyrites distributed in masses at the edge of metasomatic calcite-quartz veins, associated with pyrites;

f. Albitized rock with disseminated and aggregate arsenopyrite. Some pyrites are associated with arsenopyrite, and some are cut through by the pyrite veinlets; g. Albitized rock with disseminated arsenopyrite; h. Arsenopyrite masses and bands associated with disseminated pyrites

Qz—Quartz; Cal—Calcite; Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite

钛铁矿、闪锌矿,并形成金矿物。该阶段形成了该矿床矿石的总体面貌,约占总矿石体积分数的15%~20%。方解石石英脉(团块)为交代特征,脉(团块)内部及与成矿早阶段钠长石化岩接触部位含少量毒砂、黄铁矿等硫化物,晚于钠长石化岩形成;硫化物主要呈集合体团块状、细脉状、星点状沿钠长石化岩中的裂隙分布,部分矿物切穿钠长石、石英等矿物;硫化物及钛铁矿等金属矿物紧密连生,可见共结边等结构;毒砂、黄铁矿与金同时形成(详见后文)。

成矿晚阶段(S3)沿产状平直的裂隙充填方解石英细脉,切穿成矿早阶段形成的钠长石化岩及成矿主阶段形成的脉体(团块)(图3),可见该阶段形成最晚。细脉中含有少量星点状黄铁矿,未见金矿物,该阶段占总矿石体积分数约5%。

2.3.3 成矿主阶段主要硫化物特征

(1) 毒砂

呈团块(集合体)状、脉状、星点状构造,含量1%~5%;以团块状、脉状为主,星点状次之。

团块状:集合体直径1~5 mm,偶见>10 mm;单矿物半自形-他形结构,偶见自形晶,粒径0.5~2.0 mm,偶见>5 mm(图5e,f,h);可见轻微破碎(图5f,

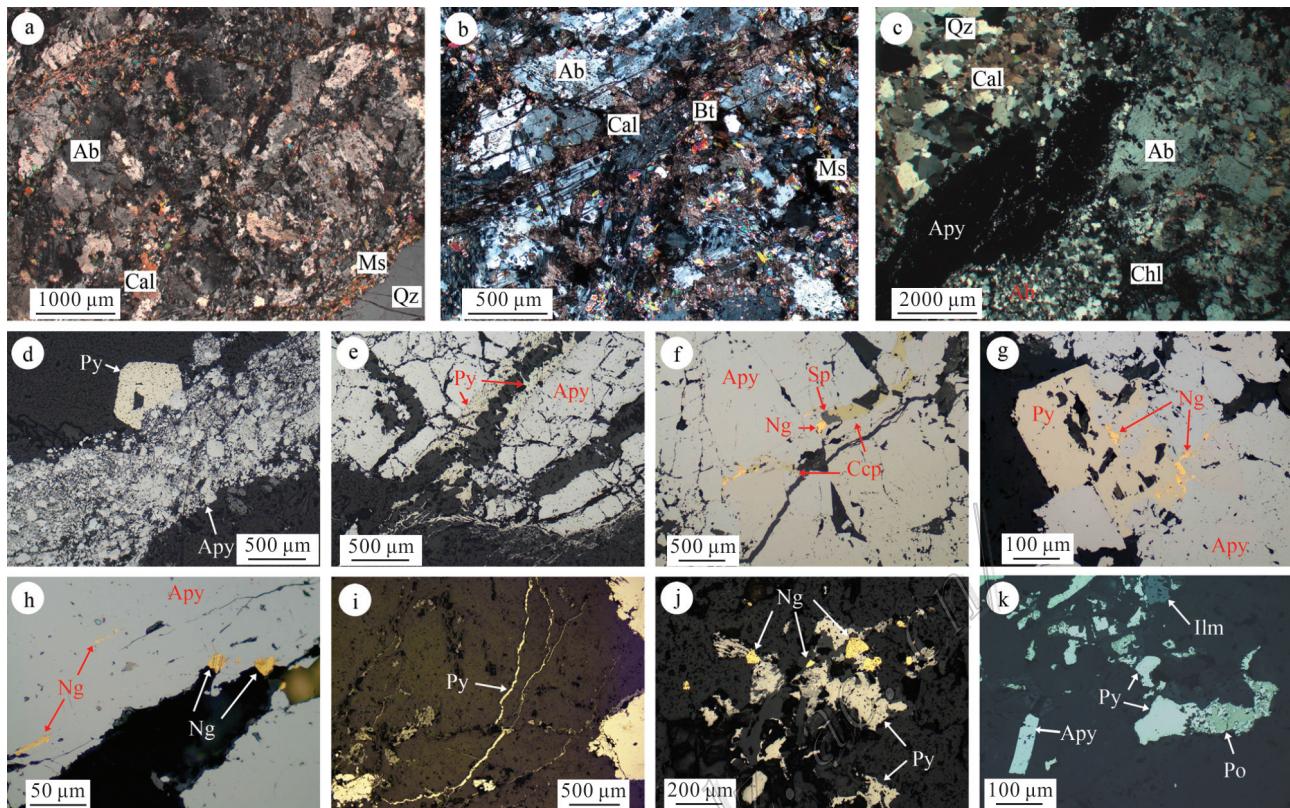


图6 三官庙金矿石显微镜下特征(a~c正交偏光,d~k反射光)

a. 钠长石化岩,含石英细脉;b. 钠长石化岩,含方解石细脉;c. 左上为方解石英英脉及其边部毒砂集合体(成矿主阶段S2),右下为钠长石化岩;d. 脉状毒砂切穿自形黄铁矿;e. 黄铁矿细脉切穿毒砂颗粒;f. 毒砂裂隙内自然金-闪锌矿-黄铜矿细脉;g. 毒砂黄铁矿共结边,粒间含自然金;h. 自然金包裹于毒砂中或分布于毒砂与非金属矿物粒间;i. 黄铁矿细脉;j. 分布于黄铁矿与非金属矿物间的自然金;k. 非金属矿物粒间共生的毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿和钛铁矿

Qz—石英;Cal—方解石;Ms—白云母;Bt—黑云母;Chl—绿泥石;Py—黄铁矿;Apy—毒砂;Po—磁黄铁矿;Sp—闪锌矿;Ccp—黄铜矿;

Ilm—钛铁矿;Ng—自然金

Fig. 6 Microscopic characteristics of San'guanmiao gold ores(a~c Crossed nicols, d~k Reflected plainlight)

a. Albitized rock with quartz veinlet; b. Albitized rock with calcite veinlets; c. Calcite-quartz vein with arsenopyrite aggregates (main-ore stage S2) on the top left part, and albitized rock on the lower right part; d. Pyrite cut through by arsenopyrite vein; e. Arsenopyrite cut through by pyrite veinlets; f. Arsenopyrite with native gold-sphalerite-chalcopyrite veinlets; g. Arsenopyrite coexistent with pyrite, and intergranular native gold between these metallic sulfides; h. Arsenopyrite with inclusion native gold, and intergranular native gold between arsenopyrite and nonmetallic mineral;

i. Pyrite veinlets; j. Intergranular native gold between pyrite and nonmetallic mineral; k. Arsenopyrite, pyrite, pyrrhotite and ilmentie

between nonmetallic minerals

Qz—Quartz; Cal—Calcite; Ms—Muscovite; Bt—Biotite; Chl—Chlorite; Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Po—Pyrrhotite; Sp—Sphalerite;

Ccp—Chalcopyrite; Ilm—Ilmentie; Ng—Native gold

图6e,h,图7i),沿裂隙可充填黄铁矿等其他硫化物(图5f,图6f),可与黄铁矿共结边同时生成(图6g),可包裹先前生成的黄铁矿(图7a,b)。

脉状:条带直径一般1~3 mm,长一般10~50 mm(图5d,图6c);单矿物半自形-他形结构,粒径<1 mm;可见轻微破碎(图7j);沿裂隙可充填黄铁矿等其他硫化物(图6e),可与黄铁矿共生(图5e),可切穿先前生成的黄铁矿(图6d)。

星点状:自形-半自形,粒径0.5~2 mm,晶型完好(图5g),未见破碎、可与黄铁矿共结边同时生成(图7g)。

(2) 黄铁矿

黄铁矿呈细脉状、呈团块(集合体)状构造,偶见星点状,含量1%~3%(图5a~c,图6j,k);以细脉状为主。

细脉状:他形,脉宽<0.5 mm,长5~20 mm;镜下难以识别单矿物(图6i);可切穿毒砂(图5f)。

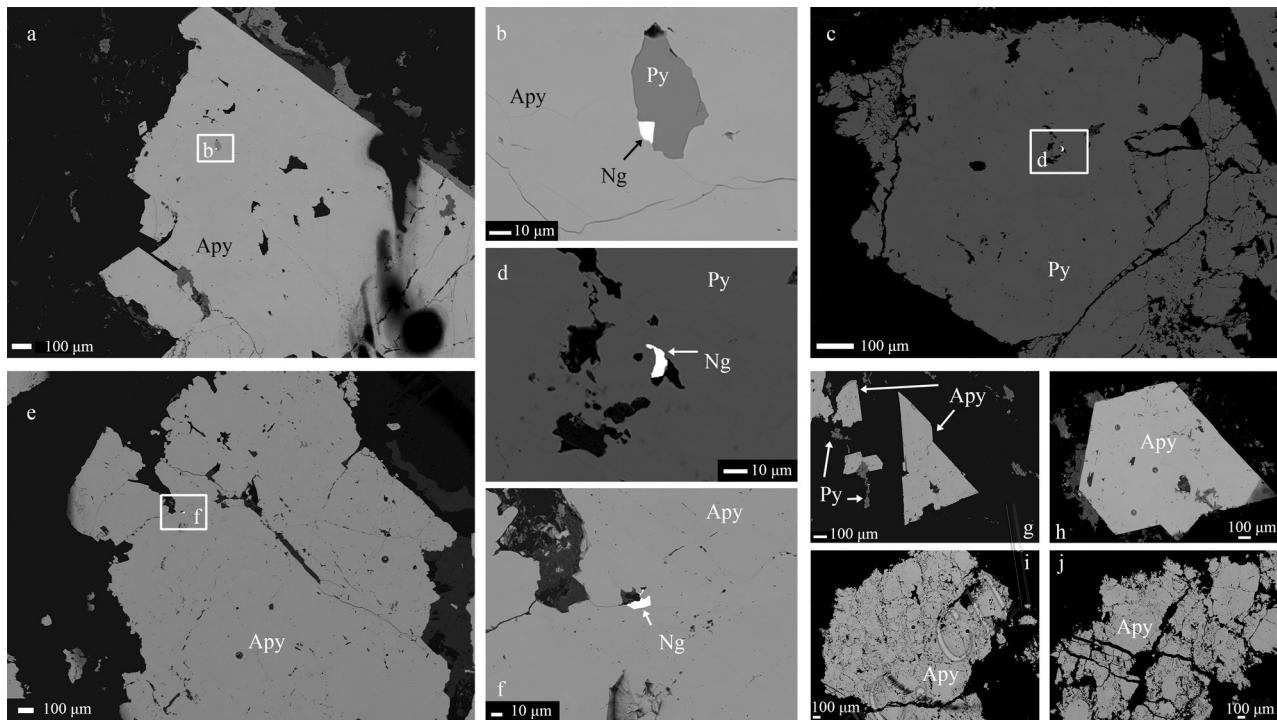


图7 三官庙金矿床自然金及载金硫化物背散射扫描电镜图像

a、b. 半自形毒砂包裹黄铁矿、自然金;c、d. 他形黄铁矿包裹自然金;e、f. 他形毒砂包裹自然金;g、h. 自形毒砂、他形黄铁矿;i、j. 他形毒砂集合体

Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Ng—自然金

Fig. 7 SEM back-scattered (BSE) image of native gold and gold-bearing sulfides in the San' guanmiao gold deposit
a, b. Inclusion native gold and pyrite within subhedral arsenopyrite; c, d. Inclusion native gold within allotriomorphic pyrite; e, f. Inclusion native gold within allotriomorphic arsenopyrite; g, h. Euhedral arsenopyrite and allotriomorphic pyrite;
i, j. Anhedral arsenopyrite aggregates
Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Ng—Native gold

团块状:团块呈不规则状、树枝状、条带状,团块0.5~5.0 mm,填隙结构发育;镜下仅可识别部分单矿物,粒径<0.5 mm;可与毒砂共生(图6g)。

成矿主阶段毒砂、黄铁矿背散射扫描电镜观察,均未见矿物生长环带,亦未见微量元素呈规律性聚集(图7,图8)。说明矿物均为同一世代;在生成过程中,热液组分、形成条件、结晶速率等参数相对均匀、平稳,未发生突变。

3 样品采集、测试方法及分析结果

3.1 光薄片鉴定及扫描电镜观察

采集7个穿脉(600中段坑道)及8个钻孔内的代表性围岩标本4件(岩性为含碳质绢云千枚岩、钠长绿泥片岩)、金矿石标本24件(包含成矿早、主、晚阶段矿石),制成探针片8件、光片20件、薄片20件,进行详细的光学显微镜下观察及背散射扫描电镜

观察。

光学显微镜下观察在西安西北有色地质研究院有限公司岩矿鉴定中心进行,仪器型号为德国CARL ZEISS Axioskop 40 A Pol偏反两用显微镜。背散射扫描电镜观察在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试室进行,仪器型号为JEOL JSM-6510A型扫描电镜。

3.2 全岩稀土元素

采集5个穿脉(600中段坑道)及2个钻孔内代表性金矿石样品8件(为成矿主阶段矿石及被主阶段蚀变的早阶段矿石)、远矿围岩样品2件(岩性为含碳质绢云千枚岩),采集矿区西段钠长角砾岩样品5件。进行全岩稀土元素含量测试,测试工作在有色金属西北矿产地质测试中心进行,仪器型号为7700X型电感耦合等离子体质谱仪,温度23°C,湿度50%。测试结果见表3、配分曲线见图9。

金矿石稀土元素总量较高,球粒陨石标准化曲

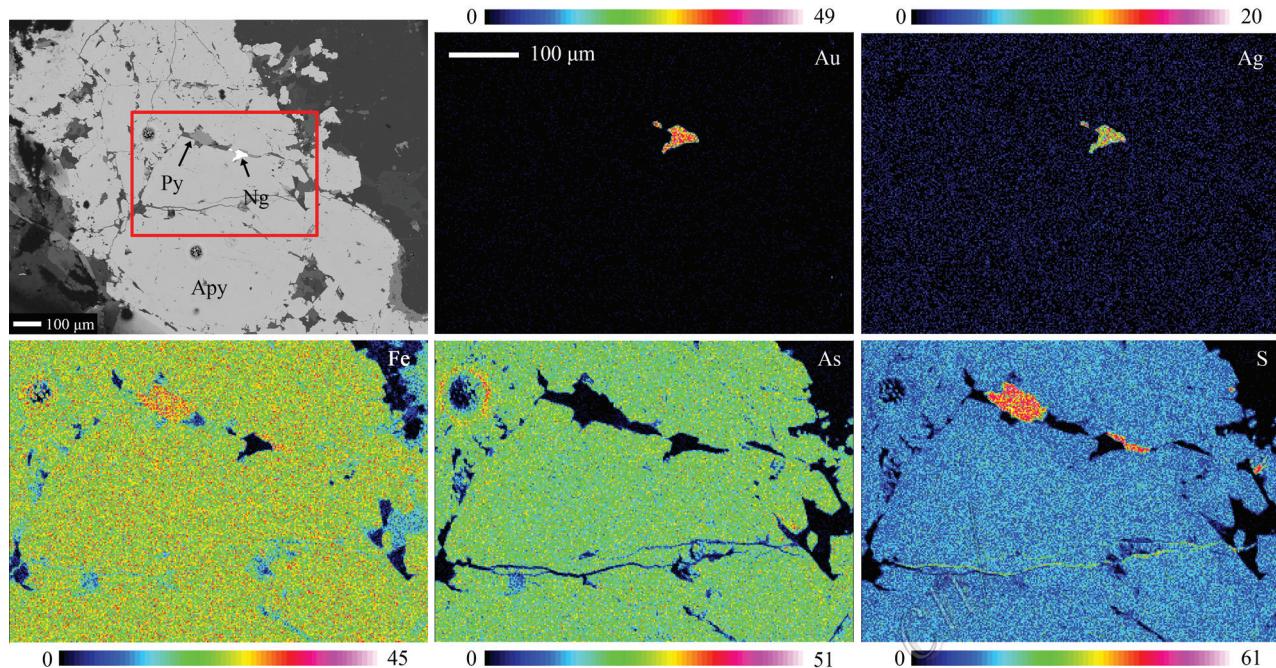


图8 三官庙金矿床载金毒砂电子探针波谱元素面扫描图(色阶条带为相对信号强度)

Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Ng—自然金

Fig. 8 EPMA scanning images of the gold-bearing arsenopyrite in the San' guanmiao gold deposit (The level bands represent the relative signal strength)

Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Ng—Native gold

线右缓倾,属轻稀土元素富集型;Eu弱负异常, δEu 为0.52~0.65,平均0.58;Ce弱正异常, δCe 为0.97~

1.14,平均1.04。钠长角砾岩的稀土元素总量较低,属轻稀土元素富集型; δEu 为0.72~0.81,平均0.77; δCe 为0.91~1.00,平均0.96。围岩稀土元素总量中等,属轻稀土元素富集型; δEu 为0.82~1.01; δCe 为1.01~1.07。

3.3 硫化物微量元素

在全岩稀土元素采样点对应位置,采集8件金矿石样品,手选去除成矿晚阶段方解石石英脉,余下成矿主阶段矿石及被主阶段蚀变的早阶段矿石,送廊坊市拓轩岩矿检测服务有限公司进行硫化物单矿物挑选。对挑选后符合测试要求的4件毒砂、3件黄铁矿单矿物,送核工业北京地质研究院实验测试中心,进行微量元素测试,仪器型号为ELEMENT XR等离子体质谱仪,温度22.3°C,湿度28%。测试结果见表4,上地壳标准化蛛网图见图10。

毒砂中微量元素平均值相对于上地壳(Rudnick et al., 2003)强烈富集(样品/上地壳>10)Co、Mo、In、Sb、Bi,较富集(10≥样品/上地壳>1)Cu、Cd、Pb;较亏损(1>样品/上地壳≥0.1)Be、Ni、Zn、W、Tl、Th、U,

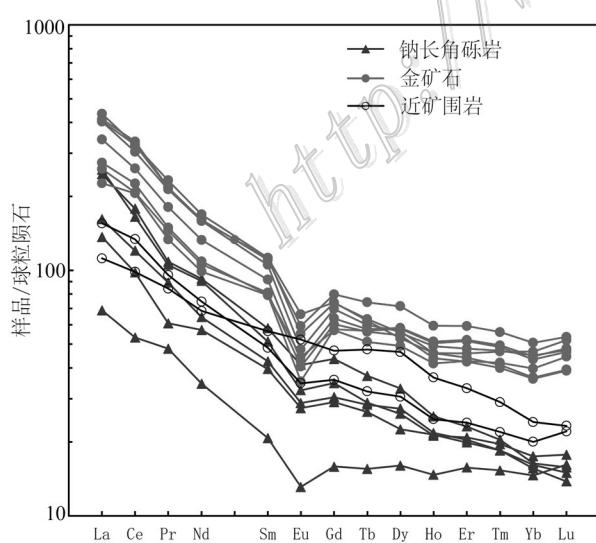


图9 三官庙金矿床稀土元素配分曲线

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of pyrites from ores, albitite-breccias and wall rocks in the San' guanmiao gold deposit

表3 三官庙金矿床稀土元素分析结果表

Table 3 REE concentrations of ores, albite-breccias and wall rocks in the San'guanmiao gold deposit

组分	钠长角砾岩						金矿石						远矿围岩			
	S2	S4	S6	S8	S10	平均	S12	S14	S18	S21	S24	S26	平均	S27	S28	平均
<i>w(B)/10⁻⁶</i>																
La	32.4	38.3	16.3	61.0	58.4	41.3	80.9	65.1	103	53.7	61.3	96.1	76.7	36.8	26.5	31.6
Ce	60.0	73.6	32.6	101	109	75.2	159	138	198	126	127	199	158	81.9	60.3	71.1
Pr	5.78	8.47	4.55	10.0	10.3	7.82	17.2	14.2	22.1	12.7	13.8	20.6	16.8	9.1	8.0	8.55
Nd	26.7	30.1	16.1	42.3	43.1	31.7	62.1	50.8	78.9	46.1	49.4	75.2	60.4	34.8	31.9	33.4
Sm	6.06	6.51	3.17	7.84	8.87	6.49	14.0	12.2	17.2	12.1	12.4	16.9	14.1	7.39	8.65	8.02
Eu	1.59	1.67	0.76	1.88	2.39	1.66	2.48	2.57	3.19	2.05	2.35	3.44	2.68	2.01	3.03	2.52
Gd	5.97	6.25	3.26	7.14	8.95	6.31	13.1	11.7	15.1	11.8	12.4	16.4	13.4	7.36	9.67	8.52
Tb	0.99	1.06	0.58	1.08	1.39	1.02	2.15	1.91	2.37	2.12	2.10	2.77	2.24	1.20	1.78	1.49
Dy	5.71	6.94	4.07	6.61	8.37	6.34	14.8	12.5	14.1	14.7	13.8	18.1	14.7	7.76	11.8	9.78
Ho	1.21	1.23	0.83	1.20	1.44	1.18	2.90	2.36	2.78	2.86	2.48	3.37	2.79	1.40	2.07	1.74
Er	3.29	3.37	2.60	3.45	3.82	3.31	8.61	7.07	7.93	8.51	7.02	9.82	8.16	3.96	5.47	4.72
Tm	0.47	0.47	0.39	0.50	0.52	0.47	1.26	1.07	1.20	1.24	1.02	1.43	1.20	0.56	0.74	0.65
Yb	2.74	2.65	2.48	2.97	2.78	2.72	7.57	6.77	7.65	7.37	6.14	8.62	7.35	3.40	4.09	3.75
Lu	0.38	0.35	0.41	0.45	0.40	0.40	1.22	1.13	1.20	1.18	0.99	1.36	1.18	0.56	0.59	0.58
Y	31.8	24.6	20.8	26.6	32.2	27.2	69.6	58.5	65.5	69.3	55.7	78.5	66.2	29.3	43.1	36.2
ΣREE	153.29	180.97	88.10	247.42	259.73	185.90	387.29	327.38	474.72	302.43	312.20	473.11	379.52	198.20	174.59	186.40
LREE	132.53	158.65	73.48	224.02	232.06	164.15	335.68	282.87	422.39	252.65	266.25	411.24	328.51	172.00	138.38	155.19
HREE	20.76	22.32	14.62	23.40	27.67	21.75	51.61	44.51	52.33	49.78	45.95	61.87	51.01	26.20	36.21	31.21
LREE/HREE	6.38	7.11	5.03	9.57	8.39	7.30	6.50	6.36	8.07	5.08	5.79	6.65	6.41	6.56	3.82	5.19
La _N /Yb _N	8.48	10.37	4.71	14.73	15.07	10.67	7.67	6.90	9.66	5.23	7.16	8.00	7.43	7.76	4.65	6.21
La _N /Sm _N	3.45	3.80	3.32	5.02	4.25	3.97	3.73	3.44	3.87	2.87	3.19	3.67	3.46	3.21	1.98	2.60
δEu	0.80	0.79	0.72	0.75	0.81	0.77	0.55	0.65	0.59	0.52	0.57	0.62	0.58	0.82	1.01	0.92
δCe	0.99	0.96	0.91	0.91	1.00	0.96	0.99	1.06	0.97	1.14	1.03	1.04	1.04	1.07	1.01	1.04

注:比值单位为1;δEu=(Eu)_N/(Sm_N×Gd_N)^{1/2},δCe=(Ce)_N/(La_N×Pr_N)^{1/2},LREE / HREE = Σ(La-Sm) / Σ(Gd-Lu);球粒陨石标准化值据Sun et al., 1989。

强烈亏损(0.1>样品/上地壳)Li、Sc、V、Cr、Ga、Rb、Sr、Cs、Ba、Re等元素。黄铁矿微量元素平均值相对于上地壳强烈富集Co、Cu、Sb、Bi,富集Ni、Mo、Tl、Pb;较亏损Be、Sc、Zn、Cd、In、W、Th,强烈亏损Li、V、Cr、Ga、Rb、Sr、Cs、Ba、Re、U等元素。

3.4 电子探针

对前述8件探针片进行电子探针微区定量分析,测试矿物均为成矿主阶段形成的硫化物(如脉状毒砂、紧密共生的毒砂黄铁矿、沿裂隙分布的硫化物等),每粒矿物测试1点;部分代表性矿物进行了元素面扫描成像。测试工作在中国地质调查局西安地质调查中心实验室完成,电子探针型号为JXA-8230型;测试条件为电压20 kV、电流1×10⁻⁸ A、束斑直径1 μm、检出角40°、环境温度23°C、湿度55%,校正方法为ZAF校正。测试分析符合GB/T15074-

2008、GB/T15246-2002标准。测试元素及检出限(质量分数)为As243×10⁻⁶、Se103×10⁻⁶、Fe138×10⁻⁶、Co125×10⁻⁶、Ni128×10⁻⁶、Cu161×10⁻⁶、Zn190×10⁻⁶、Au207×10⁻⁶、S42×10⁻⁶、Pb240×10⁻⁶、Ag85×10⁻⁶、Te94×10⁻⁶、V118×10⁻⁶、Ti91×10⁻⁶。测试结果见表5。

成矿主阶段毒砂电子探针分析,13个测点6个Au含量大于检出限,*w(Au)* 0.03%~0.20%,平均0.09%。主元素成分较稳定,*w(Fe)*为35.08%~35.90%,平均为35.43%,*w(As)*为42.22%~44.08%,平均为43.29%,*w(S)*为20.62%~21.97%,平均为21.15%。原子含量*x(Fe)*为33.70~34.08 mol%,平均33.90 mol%;*x(As)*为29.79~31.53 mol%,平均30.87 mol%;*x(S)*为34.66~36.22 mol%,平均35.23 mol%;原子含量As/S为0.82~0.91,平均0.88;Fe/(As+S)平均0.51;计算分子式FeAs_{0.91}S_{1.04}(表6),明显的偏离

表4 三官庙金矿床硫化物微量元素分析结果表

Table 4 Trace element composition of sulfides in the San'guanmiao gold deposit

样号	矿物	w(B)/10 ⁻⁶												
		Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Mo
S13	毒砂	0.429	0.716	0.743	0.326	0.207	1271	28.4	15.9	16.3	0.659	0.134	2.19	19.1
S15Apy	毒砂	0.242	0.906	0.463	0.29	0.267	489	18.6	7.08	19	0.624	0.043	0.842	20.8
S19	毒砂	1.49	0.59	2.44	2.46	0.362	1380	86	123	17.6	3.33	0.987	7.09	12
S23Apy	毒砂	0.279	0.617	0.568	0.21	0.195	1110	34.5	59	7.74	0.394	0.219	0.913	12.4
平均	毒砂	0.610	0.707	1.05	0.822	0.258	1062	41.9	51.2	15.2	1.25	0.346	2.76	16.1
S15Py	黄铁矿	0.749	0.217	2.42	0.602	0.224	219	493	792	21.8	1.37	0.437	5.31	1.44
S16	黄铁矿	0.491	0.211	1.32	0.37	0.287	168	39.2	89.3	20.9	0.948	0.211	3.18	6.81
S23Py	黄铁矿	0.443	0.411	1.1	1.55	0.971	356	295	2000	20.8	0.84	0.445	1.2	1.08
平均	黄铁矿	0.561	0.280	1.61	0.841	0.494	248	276	960	21.2	1.05	0.364	3.23	3.11
上地壳(Rudnick et al., 2003)		24	2.1	14	97	92	17.3	47	28	67	17.5	82	320	1.1
样号	矿物	w(B)/10 ⁻⁶												
		Cd	In	Sb	Cs	Ba	W	Re	Tl	Pb	Bi	Th	U	
S13	毒砂	0.157	1.09	914	0.062	4.71	0.579	0.004	0.859	38.4	23.2	1.2	0.941	
S15Apy	毒砂	0.229	1.37	695	0.024	2.63	0.554	0.004	0.029	97.7	8.35	1.22	0.25	
S19	毒砂	0.224	0.969	406	0.404	7.23	0.244	0.004	0.079	25.6	35.2	3.1	0.595	
S23Apy	毒砂	<0.002	1.16	364	0.1	1.67	0.284	<0.002	0.03	17.7	17.7	1.27	0.354	
平均	毒砂	0.203	1.15	595	0.148	4.06	0.415	0.004	0.249	44.9	21.1	1.70	0.535	
S15Py	黄铁矿	0.082	0.02	22	0.766	10.3	0.571	<0.002	0.818	17.9	4.13	0.832	0.147	
S16	黄铁矿	<0.002	0.071	20.9	0.439	5.41	0.528	0.004	2.15	25.8	1.97	1.34	0.392	
S23Py	黄铁矿	0.079	0.038	6.3	0.188	3.31	0.647	<0.002	0.31	19.4	4.2	1.06	0.228	
平均	黄铁矿	0.081	0.043	16.4	0.464	6.34	0.582	0.004	1.09	21.0	3.43	1.08	0.256	
上地壳(Rudnick et al., 2003)		0.09	0.056	0.4	4.9	628	1.9	0.198	0.9	17	0.16	10.5	2.7	

理想毒砂分子式 $\text{FeAs}_{1-x}\text{S}_{1+x}$ ($x \leq 0.13$) (Sharp et al., 1985), 显示亏损 As 的特征。毒砂中 As 与 S 呈反比关系(图11), 反映了形成过程中的相互取代。毒砂中原子含量 As/S 比主要对温度敏感, 随着温度升高, As/S 比升高(Sharp et al., 1985; Koh et al., 1992; Lentz, 2002)。毒砂中, Au 与 As、Cu、Ni 弱负相关, 与 Co 负相关, 与 S 弱正相关, 与 Fe 正相关, 与其余相关性不明显(表5)。

成矿主阶段黄铁矿电子探针分析, 8个测点中 6个 Au 含量大于检出限, $w(\text{Au})$ 为 0.04%~0.10%, 平均 0.053%。主元素成分较稳定, $w(\text{S})$ 为 51.29%~54.21%, 平均为 53.20%; $w(\text{Fe})$ 为 45.95%~47.14%, 平均为 46.54%。 $w(\text{S})/w(\text{Fe})$ 比值为 1.10~1.17, 平均 1.14; 原子计数 S/Fe 为 1.92~2.03, 平均 1.99; 与黄铁矿理论值($w(\text{S})$ 为 53.45%, $w(\text{Fe})$ 为 46.55%, S/Fe=2)基本相当。黄铁矿的 Au 与 S 弱正相关, 与 Fe 负相关, 与 Ti、Co 弱负相关, 与其余相

关性不明显(表5)。

4 金的赋存状态讨论

以粒径 0.1 μm 为界, 将矿床中金划分为“可见金”(>0.1 μm) 和“不可见金”(<0.1 μm) 2类(Cook et al., 1990)。三官庙金矿床中“可见金”和“不可见金”特征观察、讨论如下。

4.1 可见金

利用显微镜及扫描电镜对三官庙金矿石“可见金”进行的详细观察表明, 可见金以单粒金为主, 少量呈集合体状; 单粒金主要为片状、粒状、麦粒状、树枝状, 次为不规则状、丝条状、角粒状(图6f~h,j, 图7b,d,f, 图8)。单体金以细粒为主(<0.037 mm), 中粒金(0.037~0.074 mm)次之; 粗粒、巨粒金(>0.074 mm)少量。金的嵌布类型主要有粒间金、裂隙金及包裹金 3 种。金成色平均为 924.2‰(表2), 为自

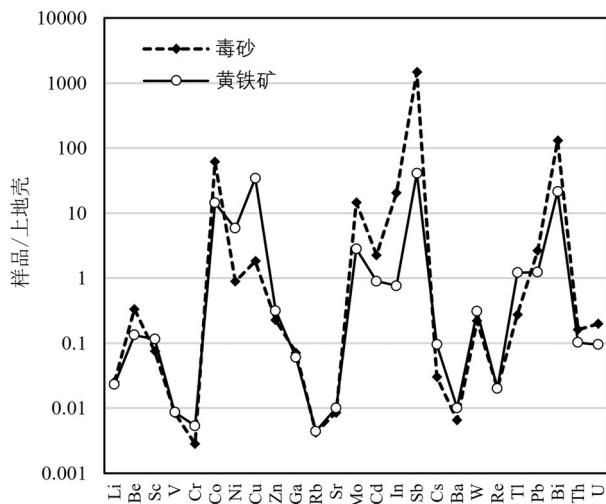


图10 三官庙金矿床毒砂、黄铁矿微量元素上地壳标准化蛛网图(上地壳数据据 Rudnick et al., 2003)

Fig. 10 Trace elements spider diagram for arsenopyrite and pyrite from the San' guanmiao gold deposit (standardized data after Rudnick et al., 2003)

然金。

主要的载金矿物毒砂内部、边缘均发育大量可见金颗粒,此类可见金呈包裹金、裂隙金及其他矿物(硫化物或非金属)粒间金形式产出,在同一毒砂单矿物中,可发现3类金同时产出的现象(图6h),说明毒砂总体与金同时生成。

主要的载金矿物黄铁矿多与可见金颗粒连生(图6g,j,图7b),为黄铁矿与其他矿物粒间金;少量呈包裹金形式产出(图7d);未发现有黄铁矿裂隙金,这些说明黄铁矿总体与金同时生成。

4.2 不可见金

在前述毒砂、黄铁矿电子探针含金测点处,利用背散射扫描电镜详细观察,未见独立金矿物,面扫描亦无金元素聚集(图8),证明部分金以“不可见金”的形式存在于矿物中。但仍存在部分不含金的测点,说明矿物中“不可见金”的分布存在不均匀性。

“不可见金”的存在形式可分为超显微包裹的纳米金(自然金或含金矿物,又称胶体金)和类质同象金(又称固溶体金、晶格金)。Reich等(2005)认为,卡林型金矿和浅成热液型金矿中约150~250°C温度范围内,含砷黄铁矿中固溶体金(Au^{+1})的溶解度(单位mol%)极限可以用Au-As的溶解度关系式($C_{\text{Au}} = 0.02 \cdot C_{\text{As}} + 4 \times 10^{-5}$)表达。Deditius等(2014)认为,造山型金矿中黄铁矿中固溶体金(Au^{+1})的溶解度(单

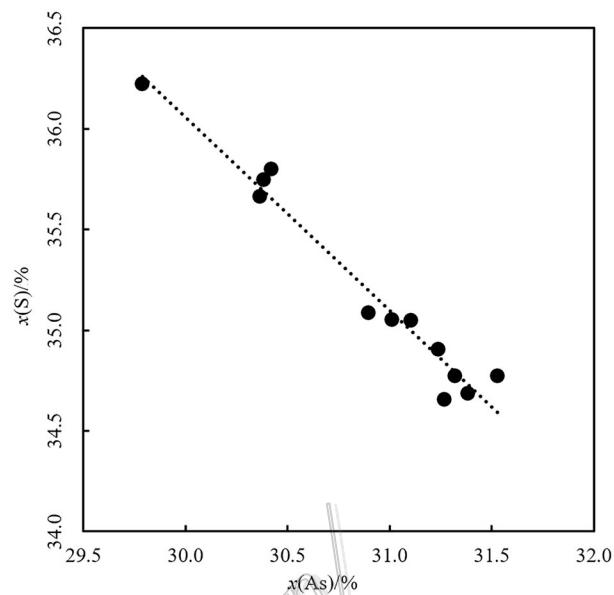


图11 三官庙金矿床毒砂S-As关系图

Fig. 11 Correlation of S-As values for arsenopyrite from the San' guanmiao gold deposit

位 mol%)极限可以用溶解度关系式($C_{\text{Au}} = 0.004 \cdot C_{\text{As}} + 2 \times 10^{-7}$)表达,远小于卡林型金矿和浅成热液型金矿床。不同类型矿床中,当Au在黄铁矿中的含量低于上述Au-As关系式时,以类质同相金存在;反之会发生过饱和而沉淀,形成超显微包裹的纳米金。

三官庙金矿床黄铁矿共有3个Au、As均检出的测点,Au含量均高于前述Au-As关系式,初步认为上述3个测点处“不可见金”以纳米金存在。毒砂中“不可见金”的Au-As含量关系,亦遵从 Reich提出的溶解率规律(Reich et al., 2005; Cepedal et al., 2008; 卢焕章等,2013; 郑禄林等,2017);三官庙金矿床毒砂8个含金测点,Au含量均低于前述Au-As关系式,初步认为“不可见金”以固溶体晶格金形式存在。但考虑到电子探针测试Au、As元素检出限较高($w(\text{As})$ 为 243×10^{-6} 、 $w(\text{Au})$ 为 207×10^{-6}),利用其测试数据分析“不可见金”的赋存状态,必然存在较大误差,因此,三官庙金矿床中“不可见金”的赋存状态,还有待进一步测试及研究。

5 矿床成因探讨

5.1 流体特征

Pal'Yanova(2008)通过对不同金矿床金的成色、矿石Au/Ag的研究,总结了不同Au/Ag特征反映的成

表5 三官庙金矿床硫化物电子探针分析结果表

Table 5 EPMA results of sulfides from the San'guanmiao gold deposit

测点序号	矿物编号	矿物名	w(B)/%													
			As	Se	Cu	Ni	Co	Fe	Ti	Te	Ag	Pb	S	Hg	Au	总和
1	SGM7-1	黄铁矿	0.04	0	0	0	0.06	46.88	0	0	0	0	53.27	0	0	100.25
2	SGM7-2	黄铁矿	0	0	0.05	0	0.05	47.14	0.09	0.04	0	0.11	53.36	0	0.04	100.88
3	SGM10-2	黄铁矿	0.04	0	0.02	0.02	0.05	45.95	0	0	0	0	53.33	0	0.10	99.51
4	SGM14-1-2	黄铁矿	0	0	0	0	0.03	46.48	0.03	0	0	0.07	51.29	0	0.04	97.94
5	SGM14-4-1	黄铁矿	0.06	0	0	0	0.05	46.13	0	0	0	0	53.48	0	0.05	99.77
6	SGM5-1	黄铁矿	0.44	0	0	0	0.07	46.66	0.04	0	0	0	53.08	0	0.04	100.33
7	SGM5-4	黄铁矿	0	0	0	0.03	0.11	46.66	0.04	0	0	0	53.57	0	0	100.41
8	SGM5-5	黄铁矿	0	0	0	0.03	0.16	46.42	0	0	0	0	54.21	0	0.05	100.87
9	SGM10-3	磁黄铁矿	0	0	0	0	0.10	59.60	0	0	0	0	39.74	0	0	99.44
10	SGM15-1	毒砂	43.35	0	0	0	0.02	35.58	0	0	0.03	0	21.07	0	0.20	100.25
11	SGM15-2	毒砂	42.78	0.11	0.04	0	0.05	35.42	0.08	0	0	0	21.55	0	0.03	100.06
12	SGM1-2	毒砂	43.46	0.11	0.06	0	0.09	35.31	0.08	0	0	0	20.62	0	0	99.73
13	SGM13-1	毒砂	42.22	0.12	0.03	0	0.05	35.90	0.02	0	0.02	0	21.97	0	0.07	100.40
14	SGM13-2	毒砂	42.48	0.14	0	0.02	0.03	35.43	0.08	0	0	0.06	21.36	0	0.07	99.67
15	SGM13-3	毒砂	43.42	0.16	0	0	0.07	35.08	0	0	0	0.05	20.76	0	0	99.54
16	SGM22-1	毒砂	43.71	0.17	0.02	0	0.02	35.27	0.02	0	0	0	20.77	0	0.07	100.05
17	SGM10-1	毒砂	44.08	0.19	0	0.02	0.07	35.12	0	0	0	0.08	20.80	0	0	100.36
18	SGM10-5	毒砂	42.96	0.15	0.02	0	0.06	35.30	0.03	0	0	0	21.41	0	0	99.93
19	SGM14-1-1	毒砂	43.69	0.23	0	0	0.05	35.65	0	0	0	0.07	21.14	0	0	100.83
20	SGM14-2	毒砂	42.94	0.11	0	0.02	0.06	35.68	0	0	0	0	21.62	0	0	100.43
21	SGM14-3	毒砂	43.96	0.18	0	0	0	35.43	0	0	0.03	0.01	20.80	0	0	100.41
22	SGM14-4-2	毒砂	43.67	0.21	0	0.02	0.06	35.42	0.04	0	0	0.04	21.06	0	0.10	100.62

表6 三官庙金矿床毒砂计算分子式

Table 6 Calculating molecular formula of arsenopyrite from the San'guanmiao gold deposit

样号	w(Au)/%	x(B)/mol%			Fe/(As+S)	As/S	计算分子式		
		As	S	Fe			Fe	As	S
SGM15-1	0.20	30.89	35.09	34.02	0.52	0.88	1	0.91	1.03
SGM15-2	0.03	30.42	35.80	33.79	0.51	0.85	1	0.90	1.06
SGM1-2	0	31.26	34.66	34.08	0.52	0.90	1	0.92	1.02
SGM13-1	0.07	29.79	36.22	33.99	0.51	0.82	1	0.88	1.07
SGM13-2	0.07	30.36	35.67	33.97	0.51	0.85	1	0.89	1.05
SGM13-3	0	31.24	34.90	33.86	0.51	0.90	1	0.92	1.03
SGM22-1	0.07	31.32	34.77	33.91	0.51	0.85	1	0.92	1.03
SGM10-1	0	31.53	34.76	33.70	0.51	0.89	1	0.94	1.03
SGM10-5	0	30.61	35.64	33.74	0.51	0.90	1	0.91	1.06
SGM14-1	0	31.01	35.05	33.94	0.51	0.91	1	0.91	1.03
SGM14-2	0	30.38	35.74	33.87	0.51	0.86	1	0.90	1.06
SGM14-3	0	31.38	34.69	33.93	0.51	0.88	1	0.92	1.02
SGM14-4-2	0.10	31.10	35.05	33.85	0.51	0.90	1	0.92	1.04

矿流体性质,三官庙金矿自然金Au/Ag平均为12.21,矿石Au/Ag平均为9.46,推測流体性质为碱性、温度200~500°C、溶液中Au、Ag以Au(HS)²⁻和Ag(HS)²⁻络合物

为主导(Pal'Yanova, 2008)。这与三官庙金矿石中未见SO₄²⁻相关矿物的地质事实相吻合。

金矿石硫化物矿物共生组合与毒砂中As含量

可限定毒砂形成温度(Kretschmar et al., 1976)。毒砂温度计在热液矿床中应用广泛(刘英俊, 1993; Lentz, 2002; 孙思辰等, 2018; Pal et al., 2019), 根据不同矿段各阶段矿物共生组合关系将毒砂的As原子百分数投于硫逸度 $\log(f(S_2))$ -温度(T)关系图解(Kretschmar et al., 1976; Sharp et al., 1985)中, 以获取毒砂形成环境信息。

三官庙金矿床毒砂与黄铁矿、磁黄铁矿共生, 虽然共生的磁黄铁矿含量较低, 但其对矿相平衡的约束作用明显, 在 T - $\log(f(S_2))$ 图解中, 三官庙金矿成矿环境处于毒砂+黄铁矿与毒砂+磁黄铁矿相边界线上。经计算, 毒砂形成温度范围 315~393°C, 平均 357°C。对应的毒砂形成 $\log(f(S_2))$ 范围为 -7.3~ -10, 平均 -8.4(图 12)。三官庙金矿床中, 毒砂、黄铁矿为主要载金矿物, 二者总体与金同时生成, 可以推测毒砂的形成温度、硫逸度 $\log(f(S_2))$ 条件可以代表金沉淀

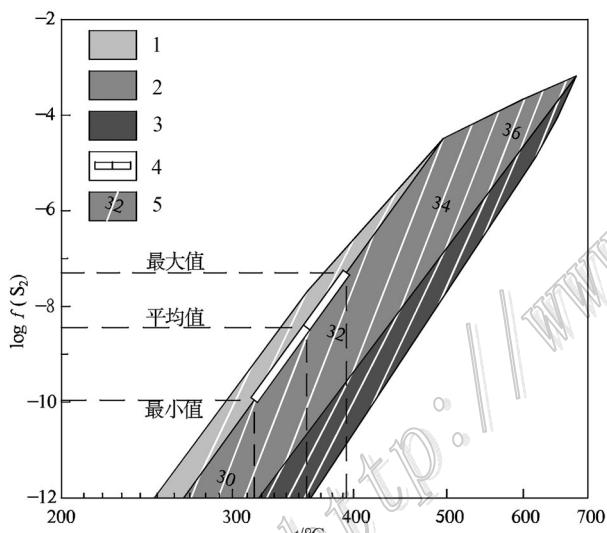


图 12 三官庙金矿床毒砂硫逸度 $\log(f(S_2))$ -温度(t)关系图解

(底图据 Kretschmar et al., 1976; Sharp et al., 1985)

1—毒砂+黄铁矿共生区; 2—毒砂+磁黄铁矿共生区; 3—毒砂+斜方砷铁矿共生区; 4—三官庙金矿床毒砂 As 原子含量范围; 5—毒砂 As 原子含量等值线

Fig. 12 $\log(f(S_2))$ -temperature (t) projection of the arsenopyrite

from the San'guanmiao gold deposit(base map after

Kretschmar et al., 1976; Sharp et al., 1985)

1—Association zone of arsenopyrite and pyrite; 2—Association zone of arsenopyrite and pyrrhotite; 3—Association zone of arsenopyrite and loellingite; 4—As atomic content range of arsenopyrite in the Sanguanmiao gold deposit; 5—As atomic content contours of arsenopyrite

时的条件。

在约 350°C 温度条件下, 溶液中 HS 稳定存在的 pH 值 > 6.2, $\log(f(O_2)) < -28.5$ (Pokrovski et al., 2011)。前述毒砂温度计得出三官庙金矿金沉淀的平均温度接近 350°C, 根据 Au/Ag 比推断成矿流体为偏碱性, 因此, 可以定性的认为成矿主阶段 $\log(f(O_2)) < -28.5$ 。

综上, 推断三官庙金矿床成矿主阶段流体性质为碱性、氧逸度 $\log(f(O_2)) < -28.5$; 计算硫逸度 $\log(f(S_2))$ 平均 -8.4; 成矿温度约 350°C。

5.2 稀土元素示踪

三官庙金矿石稀土元素总量 Σ REE 明显高于围岩及钠长角砾岩。三官庙金矿石及钠长角砾岩 δ Eu 均为负异常, 明显区别于围岩 δ Eu 基本无异常的特征(图 9)。

在相同条件下, Eu^{2+} 稳定程度与氧逸度、压力呈反比, 与温度、pH 值呈正比; 在低温、近地表条件下, 铕在水溶液中以三价态为主, 当温度超过 250°C 时, 二价铕占优势; 在约 250°C 时, Eu^{2+} 稳定存在的氧逸度上限大于 HS 氧化成 SO_4^{2-} 离子的氧逸度, 且随温度升高氧逸度差值越大(Sverjensky, 1984)。三官庙金矿石中未见 SO_4^{2-} 相关矿物, 热液中硫以 HS 形式存在, 在此氧逸度条件下, 推断成矿热液中必然存在大量 Eu^{2+} 。一般在热液中, Eu^{3+} 与 REE³⁺ 的性质相似, 共同迁移; 当热液中存在 Eu^{2+} 时, 其与 REE³⁺ 不同的地球化学性质是出现 δ Eu 异常的基础。当 Eu^{2+} 分配系数较大的矿物(如长石、重晶石)形成时, 导致与残余热液中 REE³⁺ 分离, 使残余热液向偏亏损 Eu 演化, 出现 δ Eu 负异常(或正异常降低, 或负异常扩大)(Hanson, 1980; 陈德潜等, 1990; Kalliomäki et al., 2019)。三官庙金矿石 δ Eu 值 0.58, 钠长角砾岩的为 δ Eu 值 0.77, 金矿石中 δ Eu 负异常较钠长角砾岩有所扩大, 这与钠长角砾岩形成过程中, 长石矿物对 Eu^{2+} 的分离富集有关, 导致了残余成矿热液中相对更加亏损 Eu。总体来看, 三官庙金矿床稀土元素总体特征显示了对钠长角砾岩稀土元素特征的继承性, 且钠长角砾岩先期形成时稀土元素更多的残留富集于成矿流体相中, Eu 元素相对富集于钠长角砾岩中。其后在交代蚀变及充填形成金矿体的过程中, 对原岩稀土元素特征进行了明显的改造, 使形成的金矿石稀土元素总量更高, 相较于围岩变的亏损 Eu, 相较于钠长角砾岩 Eu 亏损扩大。

5.3 微量元素示踪

黄铁矿的 Co、Ni 质量分数和 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 是最

具矿床成因意义的参数(Brill, 1989; Campbell, 1984; 严育通等, 2012)。 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 类质同象置换黄铁矿中的 Fe^{2+} , 使黄铁矿的晶胞参数增大。 FeS_2 与 CoS_2 形成连续固溶体, 而与 NiS_2 形成不连续固溶体(严育通等, 2012)。在高温条件下, Co 比 Ni 优先进入黄铁矿晶格, 使 $w(\text{Co})/w(\text{Ni}) > 1$; 在低温条件下, 反之, $\text{Co}/\text{Ni} < 1$ (顾雪祥等, 2019)。在火山热液和岩浆热液型金矿中, 热液来源是岩浆水和部分大气水的混合, 岩浆水由于温度较高, 有大量 Co 类质同象替代 Fe , 所以火山热液型和岩浆热液型金矿具有极高的 Co/Ni 比值(严育通等, 2012)。

成因相同矿床矿石中的黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 具有一定的相似性(Campbell, 1984; Bajwah et al., 1987; Brill, 1989)。Large等(2014)研究了地质历史时期洋底黑色页岩中沉积成因黄铁矿的 Co, Ni 含量范围, 显生宙时期 $w(\text{Co})$ 一般 $(30\sim 300)\times 10^{-6}$, $w(\text{Ni})$ 一般 $(200\sim 2000)\times 10^{-6}$ 。

三官庙金矿床热液期黄铁矿的 $w(\text{Co})$ 为 $(200\sim 1000)\times 10^{-6}$, $w(\text{Ni})$ 为 $(100\sim 300)\times 10^{-6}$, Co/Ni 平均3.85, 指示形成温度较高, 符合火山热液型和岩浆热液型黄铁矿的特征, 明显区别于沉积、变质成因(Campbell, 1984; Bajwah et al., 1987; Brill, 1989; 严育通等, 2012)。

金矿中黄铁矿 Co-Ni-As 变化关系, 可以判定不同的成因类型; As在黄铁矿中可类质同象替换S, 含量高低与热液中大气水/岩浆水的比值呈正比, 趋向于向低温富集。严育通等(2012)运用 Co-Ni-As 质量比三角图对各成因类型金矿床中的黄铁矿微量元素进行分析, 得出了各成因类型金矿床黄铁矿微量元素标型特征。三官庙金矿床热液黄铁矿在As-Co-Ni图解(图13)中位于①区, 反映黄铁矿为岩浆热液成因。

5.4 成因认识

三官庙金矿床产出在断裂构造中, 主要沿容矿断裂交代上、下盘围岩形成金矿石, 局部发生充填, 显示典型的热液成矿宏观地质特征。汪超等(2017a)依据金矿石矿物组成、蚀变矿物、矿体与钠长(角砾)岩空间关系等方面, 探讨了三官庙金矿与矿区钠长(角砾)岩的成因联系。本次研究认为, 三官庙金矿床矿石显示了对钠长角砾岩稀土元素特征的继承演化, 进一步佐证了二者之间的成因联系。三官庙金矿床热液黄铁矿具有较高的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值, 在As-Co-Ni微量元素图解(图13)中位于岩浆热液区等特征, 均明确指示黄铁矿为岩浆热液成因。

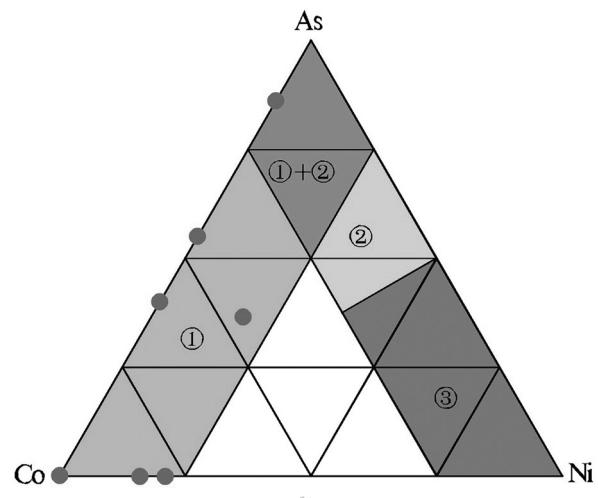


图13 三官庙金矿床黄铁矿As-Co-Ni图解(底图据严育通等, 2012)

①, ②, ③区分别为岩浆热液型、卡林型、变质热液型金矿中黄铁矿集中区

Fig. 13 Ternary diagram of As-Co-Ni of pyrite from the San' guanmiao gold deposit(base map after Yan et al., 2012)

①, ②, ③respectively represent concentration districts of pyrite form magmatic hydrothermal, Carlin-type and metamorphic hydrothermal gold deposits

Au/Ag值、热液硫化物共生组合、毒砂标型特征等表明, 三官庙金矿床成矿主阶段流体性质为碱性、氧逸度 $\log(\text{O}_2) < -28.5$ 、硫逸度 $\log(\text{S}_2)$ 平均-8.4, 成矿温度约350°C。综上认为, 三官庙金矿床为与钠长岩相关的受断裂构造控制的岩浆热液型金矿床。

6 结 论

(1) 三官庙金矿床热液期成矿阶段可划分为成矿早阶段(S1)、成矿主阶段(S2)及成矿晚阶段(S3)。成矿早阶段以强烈钠长石化、硅化围岩为特征, 形成矿石锥形; 成矿主阶段形成大量硫化物及方解石石英脉(团块), 此阶段形成金矿物; 成矿晚阶段形成平直的方解石石英细脉, 切穿早阶段及主阶段形成的岩石。

(2) 载金硫化物主要为毒砂(计算分子式 $\text{FeAs}_{0.91}\text{S}_{1.04}$)、黄铁矿, 总体与金同时生成。矿石中毒砂以团块状、脉状为主, 黄铁矿以细脉状为主。载金矿物均为同一世代, 形成环境条件稳定。

(3) 三官庙金的赋存状态分为“可见金”与“不可见金”。“可见金”为自然金, 以细粒、单粒金为主,

嵌布类型为粒间金、裂隙金及包裹金;“不可见金”普遍分布于黄铁矿、毒砂等硫化物中。

(4) 三官庙金矿床成矿热液平均硫逸度 $\log f(S_2)$ 为 -8.4, 初步判断成矿热液性质为碱性、氧逸度 $\log f(O_2) < -28.5$ 。金矿石具 δEu 负异常, 稀土元素总体特征显示了对钠长角砾岩的继承性。黄铁矿微量元素显示为岩浆热液成因。毒砂温度计计算表明成矿温度约为 350°C。三官庙金矿床成因为与钠长岩相关的受断裂构造控制的岩浆热液型金矿床。

致谢 感谢商南金牛工贸有限公司负律主任对野外坑道取样的支持,感谢西安西北有色地质研究院有限公司岩矿鉴定中心李英高工在镜下鉴定方面提供的帮助。2位匿名审稿人对论文提出了建设性的修改意见,在此表示衷心感谢。

References

- Bajwah Z U, Seccombe P K and Offier R. 1987. Trace element distribution, Co:Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. Mineralium Deposita, 22: 292-300.
- Brill B A. 1989. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. The Canadian Mineralogist, 27: 263-274.
- Campbell F A. 1984. Nickel and cobalt in pyrrhotite and pyrite from the Faro and Sullivan orebodies[J]. The Canadian Mineralogist, 22: 503-506.
- Cepedal A, Fuertes-Fuente M, Martin-Izard A, Gonzalez-Nistal S and Barrero M. 2008. Gold-bearing As-rich pyrite and arsenopyrite from the El Valle gold deposit, Asturias, northwestern Spain[J]. The Canadian Mineralogist, 46(1): 233-247.
- Chen C H, Zhang Y, Gu X X, Li B H, Dai H Z, Cheng W B, Zhao D K and He C X. 2013. Modes of occurrence of gold in arsenopyrite from Miaolong gold deposit in Sandu, Guizhou Province[J]. Mineral Deposits, 32(5): 932-940(in Chinese with English abstract).
- Chen D Q and Chen G. 1990. Practical REE geochemistry[M]. Beijing: Metallurgic Industry Publishing House. 223-232(in Chinese with English abstract).
- Cook N J and Chryssoulis S L. 1990. Concentration of “invisible” gold in the common sulfides[J]. The Canadian Mineralogist, 28(1): 1-16.
- Deditius A P, Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, Chryssoulis S L, Walshe J and Ewing R C. 2014. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 140: 644-670.
- Fan H R, Li X H, Zuo Y B, Chen L, Liu S, Hu F F and Feng K. 2018. In-situ LA-(MC)-ICPMS and (Nano) SIMS trace elements and sulfur isotope analyses on sulfides and application to confine metallogenetic process of ore deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 34 (12): 3479-3496(in Chinese with English abstract).
- Gu X X, Li B H, Zhang Y M, Peng Y W and Xiang Z L. 2019. Research methods and applications of mineral deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House. 183-243(in Chinese).
- Hanson G N. 1980. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 8 (1): 371-406.
- Hu X S and Li L J. 2001. Classification of primary gold ore deposit and discussion of some problems on forming gold ore deposit in Qinling area, Shaanxi[J]. Gold Science and Technology, 9(1): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Hu X S, Li J B, Liu X W, Wang C, Wang X Y, Hu Y P and Gu Y M. 2015. Geology, mineralization type and ore prospecting of gold deposit in Zhongcun of Shanyang and Xianghe of Shangan area[J]. Geology of Shanxi, 33(2): 70-77(in Chinese with English abstract).
- Hu X S, Zhu H Z, Wang C and Yuan L X. 2019. New discussion on genesis of Yindongzi silver-lead polymetallic deposit in Shaanxi[J]. Mineral Exploration, 10(8): 1801-1808(in Chinese with English abstract).
- Jin X P, Han W L and Wu T C. 2014. The geological characteristics and prospecting criteria of the San’ guanmiao gold deposit, Shaanxi[J]. North China Resources, 6: 70-72(in Chinese).
- Kalliomäki H, Wagner T, Fusswinkel T and Schultze D. 2019. Textural evolution and trace element chemistry of hydrothermal calcites from Archean gold deposits in the Hattu schist belt, eastern Finland: Indicators of the ore-forming environment[J]. Ore Geology Reviews, 112: 103006.
- Kerr L C, Craw D and Youngson J H. 1999. Arsenopyrite compositional variation over variable temperatures of mineralization, Otago Schist, New Zealand[J]. Econ. Geol., 94(1): 123-128.
- Koh Y K, Choi S G, So C S, Choi S H and Uchida E. 1992. Application of arsenopyrite geothermometry and sphalerite geobarometry to the Taebaek Pb-Zn(-Ag) deposit at Yeonhwa I mine, Republic of Korea[J]. Mineralium Deposita, 27: 58-65.
- Kretschmar U and Scott S D. 1976. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application[J]. The Canadian Mineralogist, 14(3): 364-386.
- Large R R, Halpin J A, Danyushevsky L V, Maslennikov V V, Bull S W, Long J A, Gregory D D, Lounejeva E, Lyons T W, Sack P J, McGoldrick P J and Calver C R. 2014. Trace element content of sedimentary pyrite as a new proxy for deep-time ocean-atmosphere evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 389: 209-220.
- Lee M, Shin D, Yoo B, Im H, Pak S and Choi S. 2019. LA-ICP-MS trace element analysis of arsenopyrite from the Samgwang gold deposit, South Korea, and its genetic implications[J]. Ore Geology Reviews, 114: 103-147.
- Lentz D R. 2002. Sphalerite and arsenopyrite at the Brunswick No.12 massive sulfide deposit, Bathurst camp, New Brunswick: Constraints on $P-T$ evolution[J]. The Canadian Mineralogist, 40(1):

- 19-31.
- Li Y, Su C Q and Liu J Q. 1999. Characteristics and genesis of the albitite in the East Qinling Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(2): 121-127(in Chinese with English abstract).
- Liang W Y. 1996. Au enrichment law, ore-controlling factors and selection of ore-prospecting target area in eastern Shanyang, Shaanxi[R]. Shaanxi: Xi'an College of Geology(in Chinese with English abstract).
- Liu C H. 2016. Metallogenetic mechanism and regularity of the Shuangwang gold deposit, Shaanxi Province(dissertation for Doctor degree)[D]. Supervisor: Zhai Y S. Beijing: China University of Geoscience(in Chinese with English abstract).
- Liu Y J. 1993. Characteristics and metallogenetic geochemistry background of gold deposit in Jiangnan region[M]. Nanjing: Nanjing University Press. 129-133(in Chinese).
- Lu H Z, Zhu X Q, Shan Q and Wang Z G. 2013. Hydrothermal evolution of gold-bearing pyrite and arsenopyrite from different types of gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 32 (4):823-842(in Chinese with English abstract).
- Makoundi C, Zaw K, Large R R, Meffre S, Lai C K and Hoe T G. 2014. Geology, geochemistry and metallogenesis of the Selinsing gold deposit, Central Malaysia[J]. *Gondwana Research*, 26(1) : 241-261.
- Pal D, Chinnasamy S S, Goon S, John M M and Ghosh S. 2019. Alteration mineralogy, fluid inclusions and stable isotope studies from Chigargunta and Bisanatham gold deposits, South Kolar Greenstone Belt, Dharwar Craton, India: Implications on genesis of gold mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 111: 102946.
- Pal' Yanova G. 2008. Physicochemical modeling of the coupled behavior of gold and silver in hydrothermal processes: Gold fineness, Au/Ag ratios and their possible implications[J]. *Chemical Geology*, 255(3-4): 399-413.
- Pokrovski G S and Dubrovinsky L S. 2011. The S³⁻ ion is stable in geological fluids at elevated temperatures and pressures[J]. *Science*, 331(6020):1052-1054.
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, Palenik C S, Chrysoulis S L and Ewing R C. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781-2796.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental Crust[A]. D. H. Editors-in-Chief: Heinrich, Karl K. T. Treatise on geochemistry[C]. Oxford: Elsevier-Pergamon. 1-64.
- Sharp Z D, Essene E J and Kelly W C. 1985. A re-examination of the arsenopyrite geothermometer: Pressure considerations and applications to natural assemblages[J]. *The Canadian Mineralogist*, 23 (4): 517-534.
- Simon G, Keeler S E and Chrysoulis S. 1999. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin implications for deposition of gold in Carlin-Creeks deposits[J]. *Nevada Economic*, 94: 405-421.
- Su C Q, Hu J M, Li Y and Liu J Q. 2006. The existence of two different tectonic attribute in Yaolinghe Group in South Qinling region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(4): 227-298(in Chinese with English abstract).
- Sun S C, Zhang L, Wu S G, Gao L, Peng J S and Wen T. 2018. Metallogenetic mechanism of the Huangjindong gold deposit, Jiangnan Orogenic Belt: Constraints from mineral formation environment and physicochemical conditions of metallogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5):1469-1483(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42: 313-345.
- Sverjensky D A. 1984. Europium redox equilibria in aqueous solution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 67: 70-78.
- Wang C, Men W H, Wu T, Zhang X F, Li Y and Hu X S. 2016. Geological characteristics, geochemical characteristics of primary halos and their prospecting significance about San'guanmiao gold deposit in Shaanxi Province[J]. *Gold Science and Technology*, 24 (6): 39-48(in Chinese with English abstract).
- Wang C M, Chen L, Bagas L, Liu Y J, He X Y and Lai X R. 2016. Characterization and origin of the Taishanmiao aluminous A-type granites: Implications for Early Cretaceous lithospheric thinning of the North China Craton[J]. *International Journal of Earth Science*, 105: 1563-1589.
- Wang C, Gu Y M, Hu X S, Meng W H, Yang H T, Wu T, Wang Y L and Zhao Y F. 2017a. Geological characteristics of the albitite and gold deposit, and the prospecting direction in San'guanmiao-Jiucaigou area, Shangnan, Shaanxi[J]. *Gold Science and Technology*, 25(1): 35-45(in Chinese with English abstract).
- Wang C, Meng W H, Niu L, Hu X S, Wu T, Li C, Yang H T, Zhang K, Liu X L, Wang S L and Gu Y M. 2017b. Geological survey report on deep and peripheral of San'guanmiao gold deposit, Shangnan County, Shaanxi Province[R]. Xi'an Northwest Geology Research Institute of Nonferrous Metals Co., Ltd.(in Chinese).
- Yan Y T, Li S R, Jia B J, Zhang N and Yan L N. 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Earth Science Frontiers*, 19 (4): 214-226(in Chinese with English abstract).
- Zheng L L, Yang R D, Chen J, Gao J B, Zhang Xu and Wei H R. 2017. Typomorphic characteristics of pyrite, arsenopyrite and occurrence of gold in the giant Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou[J]. *Geological Review*, 63(5): 1361-1377(in Chinese with English abstract).
- Zhou T C, Sun X, Zheng Y Y, Wu S, Geng X B and Yu M. 2015. Characteristics of gold-bearing minerals and modes of occurrence of gold in Chalapu gold deposit, southern Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 34(3): 521-532.

附中文参考文献

陈翠华, 张燕, 顾雪祥, 李保华, 代鸿章, 程文斌, 赵德坤, 何朝鑫.

2013. 贵州苗龙金矿床毒砂中金的赋存状态研究[J]. 矿床地质, 32(5): 932-940.
- 陈德潜, 陈刚. 1990. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社. 223-232.
- 范宏瑞, 李兴辉, 左亚彬, 陈蕾, 刘尚, 胡芳芳, 冯凯. 2018. LA-(MC)-ICPMS 和(Nano)SIMS 硫化物微量元素和硫同位素原位分析与矿床形成的精细过程[J]. 岩石学报, 34(12): 3479-3496.
- 顾雪祥, 李葆华, 章永梅, 彭义伟, 向中林. 2019. 矿床学研究方法及应用[M]. 北京: 地质出版社. 183-243.
- 胡西顺, 李领军. 2001. 陕西省原生金矿类型的划分与金矿成矿的若干问题讨论[J]. 黄金科学技术, 9(1): 1-9.
- 胡西顺, 李建斌, 刘新伟, 汪超, 王向阳, 胡远平, 谷玉明. 2015. 山阳中村-商南湘河一带金矿成矿地质背景、矿床类型与找矿方向[J]. 陕西地质, 33(2): 70-77.
- 胡西顺, 朱红周, 汪超, 原莲肖. 2019. 陕西银硐子银铅多金属矿床成因新探[J]. 矿产勘查, 10(8): 1801-1808.
- 靳小鹏, 韩文龙, 吴铜锤. 2014. 论陕西省三官庙金矿地质特征及找矿标志[J]. 华北国土资源, 6: 70-72.
- 李勇, 苏春乾, 刘继庆. 1999. 东秦岭造山带钠长岩的特征、成因及时代[J]. 岩石矿物学杂志, 18(2): 121-127.
- 梁文艺. 1996. 陕西山阳东部金矿控矿因素富集规律及找矿靶区优选研究[R]. 陕西: 西安地质学院.
- 刘冲昊. 2016. 陕西双王金矿床成矿机制与成矿规律(博士论文)[D]. 导师: 翟裕生. 北京: 中国地质大学.
- 刘英俊. 1993. 江南金矿及其成矿地球化学背景[M]. 南京: 南京大学出版社. 129-133.
- 卢焕章, 朱笑青, 单强, 王中刚. 2013. 金矿床中金与黄铁矿和毒砂的关系[J]. 矿床地质, 32 (4): 823-842.
- 苏春乾, 胡建民, 李勇, 刘继庆. 2006. 南秦岭地区存在两种不同构造属性的耀岭河群[J]. 岩石矿物学杂志, 25(4): 227-298.
- 孙思辰, 张良, 吴圣刚, 高磊, 彭劲松, 文亭. 2018. 江南造山带黄金洞金矿床成矿机制: 矿物形成环境与金成矿物理化学条件制约[J]. 岩石学报, 34(5): 1469-1483.
- 汪超, 门文辉, 吴涛, 张晓富, 李英, 胡西顺. 2016. 陕西三官庙金矿床地质特征、原生晕分带特征及其找矿意义[J]. 黄金科学技术, 24 (6): 39-48.
- 汪超, 谷玉明, 胡西顺, 门文辉, 杨海涛, 吴涛, 王瑜亮, 赵彦峰. 2017a. 陕西三官庙-韭菜沟地区钠长岩与金矿床地质特征及找矿方向[J]. 黄金科学技术, 25(1): 35-45.
- 汪超, 门文辉, 牛亮, 胡西顺, 吴涛, 李超, 杨海涛, 张凯, 刘晓璐, 王淑利, 谷玉明. 2017b. 陕西省商南县三官庙金矿深部及外围普查地质报告[R]. 西安西北有色地质研究院有限公司.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 张娜, 闫丽娜. 2012. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 19(4): 214-226.
- 郑禄林, 杨瑞东, 陈军, 高军波, 张旭, 魏怀瑞. 2017. 黔西南普安泥堡大型金矿床黄铁矿与毒砂标型特征及金的赋存状态[J]. 地质论评, 63(5): 1361-1377.
- 周天成, 孙祥, 郑有业, 吴松, 耿学斌, 于森. 2015. 藏南查拉普金矿床载金矿物特征与金的赋存状态[J]. 矿床地质, 34(3): 521-532.