

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.013

南秦岭柞水-山阳矿集区王家坪金矿床地质特征及矿床成因探讨

丁坤^{1,4}, 王瑞廷^{2,3,4,*}, 王智慧¹, 刘凯⁵, 申喜茂⁶

(1. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714099; 2. 陕西省矿产资源综合利用工程技术研究中心, 陕西 西安 710054; 3. 西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西 西安 710054; 4. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 5. 商洛西北有色七一三总队有限公司, 陕西 商洛 726000; 6. 西安西北有色地质研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:王家坪矿床位于南秦岭柞水-山阳矿集区东部, 金矿体主要产于上泥盆统星红铺组沉积地层中; 金属矿物以黄铁矿为主, 与金成矿关系密切的矿物为黄铁矿和雌黄。笔者利用 LA-ICPMS 和 LA-MC-ICPMS 对成矿期不同阶段硫化物进行微量元素及硫同位素研究, 结果表明, 该矿床成矿中阶段黄铁矿 Co/Ni 值为 0.003~1.1, 均小于 1, 暗示黄铁矿不可能为火山成因; 成矿晚阶段黄铁矿 Co/Ni 值介于 0.02~5.87, 表明该阶段黄铁矿与岩浆作用和沉积作用有关。硫同位素测试结果显示, 成矿早阶段硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -28.5‰~20.33‰, 成矿中阶段硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -28.5‰~-19.95‰, 成矿晚阶段硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 11.91‰~20.33‰, 暗示硫同位素组成变化很大, 具有明显的多源性特征, 成矿过程中硫可能由岩浆 S 和赋围岩 S 混合而成。王家坪矿床为卡林型金矿床, 该矿床的发现对在柞水-山阳矿集区寻找卡林型金矿床具有重要借鉴意义。

关键词:成矿物质来源; 硫同位素; 微量元素; 王家坪金矿床; 柞水-山阳矿集区

中图分类号: P611.01

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)01-0167-12

Geological Characteristics and Genesis of the Wangjiaping Gold Deposit in Zhashui-Shanyang Ore Concentration area of South Qinling

DING Kun^{1,4}, WANG Ruiting^{2,3,4,*}, WANG Zhihui¹, LIU Kai⁵, SHEN Ximao⁶

(1. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714099, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Northwest Geological Exploration for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. No. 713 Geological Team, Northwest Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals, Shangluo 726000, Shaanxi, China; 6. Xi'an Northwest Research Institute of Nonferrous Metals Limited Company, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Wangjiaping gold deposit is located in the east of Zhashui-Shanyang ore concentra-

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-07-15; 网络发表日期: 2021-12-06; 责任编辑: 曹佰迪, 吕鹏瑞

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目(21JK0581), 长安大学科技处创新团队培育资助项目(300102279401), 陕西铁路工程职业技术学院科研项目(KY2020-42)和陕西铁路工程职业技术学院科技创新团队项目(KJTD202001)联合资助。

作者简介: 丁坤(1990-), 男, 博士, 讲师, 主要从事矿床学方向的研究工作。E-mail: 1003492885@qq.com。

* 通讯作者: 王瑞廷(1969-), 男, 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。E-mail: wrtyf@163.com。

tion area in South Qinling. The gold ore body mainly lies in the sedimentary strata of the upper Devonian Xinghongpu Formation, with pyrite being the main metal mineral. Gold mineralization are closely related to pyrite and orpiment. In this paper, LA-ICPMS and LA-MC-ICPMS were used to study the trace elements and sulfur isotopes of sulfide in different stages of mineralization. The results show that the Co/Ni ratios of pyrite in the middle stage of mineralization range from 0.003 to 1.1, most of which are less than 1, excluding volcanic origin. In addition, The Co/Ni ratios of pyrite in the late stage of mineralization range from 0.02 to 5.87, suggesting that pyrite in this stage is related to magmatism and sedimentation process. The S isotope results show that the $\delta^{34}\text{S}$ value of early sulfide ranges from -28.5‰ to 20.33‰ . The sulfide from intermediate stage ranges from -28.5‰ to -19.95‰ , whereas the late sulfide ranges from 11.91‰ to 20.33‰ , suggesting an inhomogeneous sulfur isotopic composition and an obvious multi-source characteristics. Hence, it is inferred that the sulfur may be derived from the mixture of sulfur and host rock sulfur. Therefore, the Wangjiaping deposit is a Carlin-type gold deposit. It has great significance for the future prospecting of Carlin-type gold deposit in Zhashui-Shanyang ore concentration area.

Keywords: source of ore-forming material; S isotope; trace elements; Wangjiaping gold deposit; Zhashui-Shanyang ore concentration area

卡林型金矿床是因 19 世纪 60 年代在美国内华达州卡林镇薄层碳质粉砂质碳酸盐岩中发现微细浸染状金矿床而得名,继而在美国内华达州、犹他州、中国滇黔桂及陕甘川等地区又发现了大量同类型的金矿床。在四川省西北地区于 20 世纪 80 年代首次发现联合村金矿,其成矿特征与美国内华达卡林型金矿高度相似,因而被认为是卡林型金矿床。之后在陕甘川交界区发现了大量该类型矿床。目前,关于卡林型金矿的研究已经涉及到矿石元素组合、金赋存状态、成矿物质来源、成矿时代、成矿作用和矿床成因等诸多方面(Cline et al., 2005; Mntean et al., 2011)。

柞水-山阳矿集区是中国重要的铜金多金属矿集区,在山阳-凤镇断裂的南北两侧分布有二台子-凤镇-夏家店和青林沟-王家沟-庙梁卡林-类卡林型金矿成矿带(王瑞廷等, 2008; 方维萱等, 2013; 丁坤等, 2021)。王家坪金矿床位于二台子-凤镇-夏家店卡林-类卡林型金矿成矿带中,是该区具有代表性的金矿床之一。2011 年起,西北有色地质矿业集团持续在该矿集区进行物探、化探和地质勘查等找矿工作,目前已发现夏家店、龙头沟等多个大中型金矿床。在王家坪矿区 6 条成矿带中共圈出 8 条金矿体,估算 $331+332+333$ 金金属资源量 5.77 t ,矿床规模已达中型,找矿潜力巨大。前人对王家坪金矿

床的地质背景、金的赋存状态、矿床地球化学、成矿机制、矿床成因和成矿规律等进行了研究,积累了宝贵的研究资料(胡西顺等, 2012; 邵乐奇, 2017)。但是通常运用岩石地球化学及碳、氢、氧等同位素地球化学分析来探讨金矿床成矿物质来源(刘新伟等, 2016; Ma et al., 2018)。近 20 年来,微区原位分析等先进测试技术手段在卡林型金矿床成矿作用和矿床成因等研究中得到了快速发展和应用,取得了重要进展和突破(邵乐奇, 2017; 李建新等, 2019)。

笔者在总结前人研究成果的基础上,开展了详细的野外地质调查工作,结合室内镜下鉴定,首次采用硫化物原位微区微量元素及硫同位素研究,探讨黄铁矿成因及成矿物质来源,约束金矿床成因,进而为该区下一步找矿勘查及研究工作提供科学依据。

1 地质背景

秦岭造山带东、西两段在构造演化、物质组成和基底属性上差异明显,故以徽县-成县盆地界,东部为东秦岭,西部为西秦岭(冯益民等, 2003)。在地理上以宝成铁路为界,西侧称为西秦岭,东侧称为东秦岭。柞水-山阳矿集区位于秦岭造山带南部,其大地构造归属为中秦岭弧前盆地系(王宗起等, 2002, 2009),为中国重要的多金属矿集区之一。区域性山

阳-凤镇断裂和镇安-板岩镇断裂东西向贯穿全区,控制了区内主要矿产的分布,对沉积环境及成矿后期构造热液的强烈改造起着重要的制约作用。在该矿集区先后已发现了 20 余个大小不等的金矿床(点),主要分布在山阳-凤镇断裂南北两侧。例如,二台子、龙头沟、夏家店和王家坪等大-中型金矿床。

王家坪金矿床位于陕西省山阳县十里镇,矿区出露地层较为复杂,以泥盆系为主,与矿区东北侧寒

武系一奥陶系石瓮子组白云岩呈断层或不整合接触。地层由老到新依次为:下泥盆统馒头山组(D_3m)、中泥盆统大枫沟组(D_2d)、古道岭组(D_2g)、上泥盆统星红铺组(D_3x)(图 1)。上泥盆统星红铺组(D_3x)主要为一套浅变质黏土岩夹碳酸盐岩地层,沉积环境为滨海河口湾相,岩性为泥砂质灰岩与钙质板岩互层,夹少量千枚岩,王家坪金矿体主要赋存在星红铺组中。

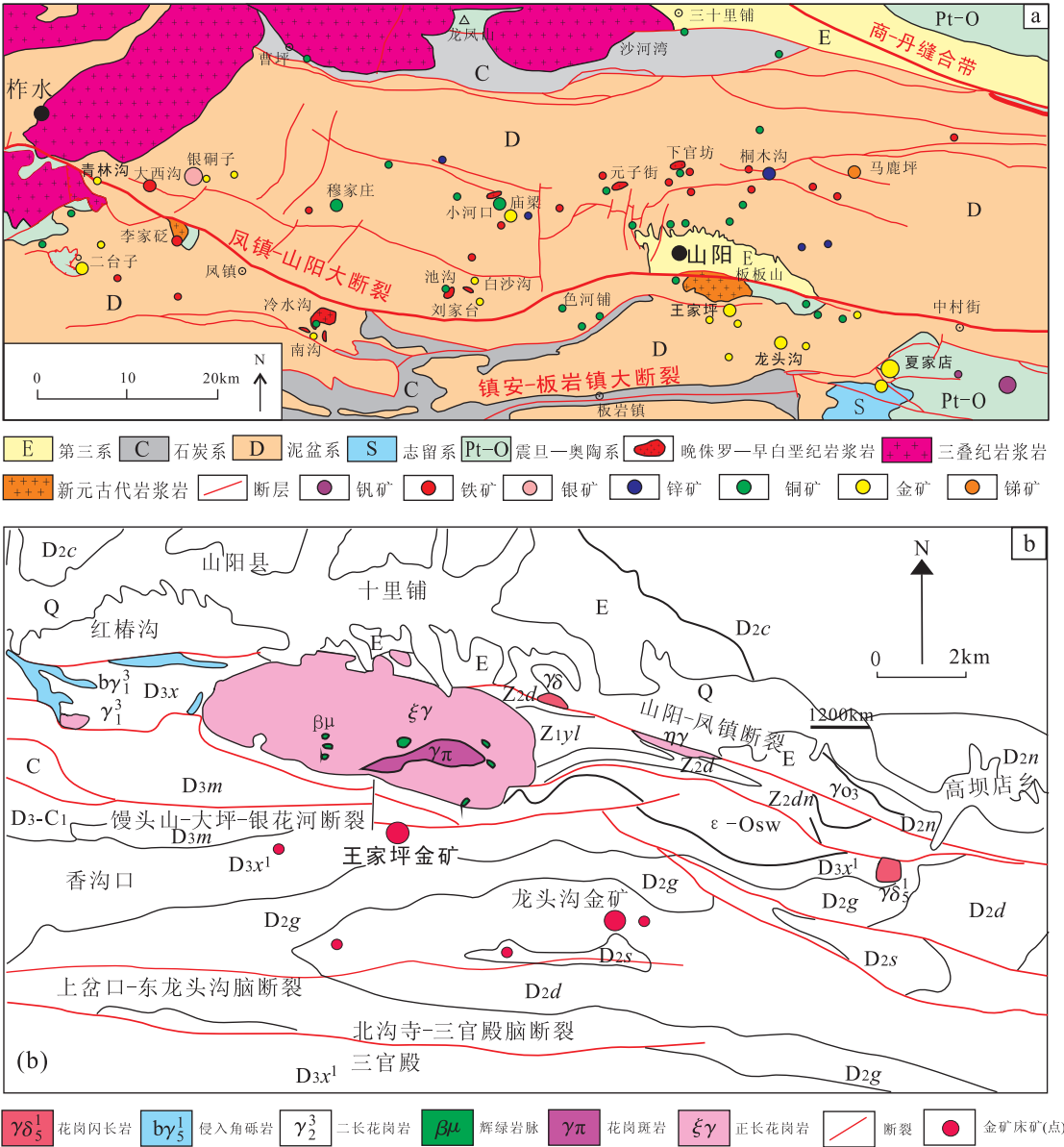


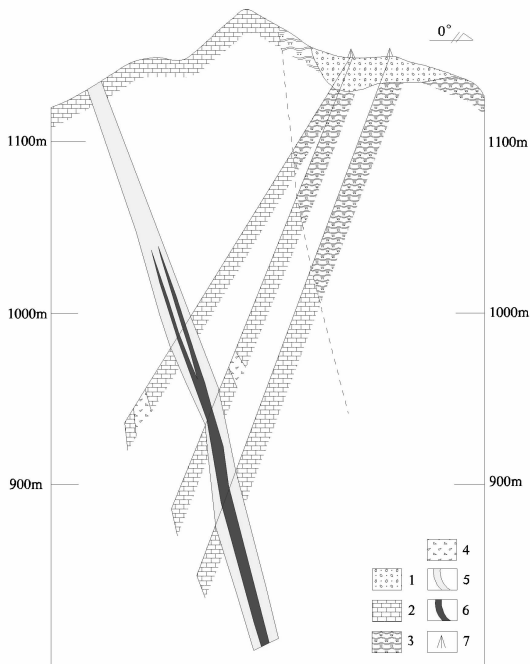
图 1 (a)柞水-山阳矿集区区域地质矿产图(据刘凯等,2019)及(b)王家坪金矿区地质简图(据邵乐奇,2017)

Fig. 1 (a) Location map of the Zhazhui-Shanyang ore concentration area and (b)Geological sketch of the Wangjiaping gold deposit

矿区褶皱、断裂构造发育,主要包括纸房沟-瓦房店-中村背斜和馒头山-大坪-银花河断裂。馒头山-大坪-银花河断裂呈东西向分布,长 4.7 km,宽 1~10 m,整体倾向北,倾角为 $72^{\circ}\sim 84^{\circ}$,具逆断层性质,为本区主要控矿构造。

矿区北部出露板山岩体,面积约 20 km²,是区域最大的复式岩体。其岩石类型有二长花岗岩、花岗闪长岩和钾长花岗岩,属钙碱性弱过铝质花岗岩,岩体内及附近围岩蚀变均极弱,与其有关的矿产尚未发现。其中,地表出露最广的为二长花岗岩和钾长花岗岩。吴发富等(2013)通过锆石(SHRIMP)法测得钾长花岗岩年龄为 730 Ma。

目前,在区内共圈出了 8 条矿体,各矿体均呈近东西向展布,产状近于一致,平行产出。其中,Ⅱ-1 矿体规模较大(图 2),Ⅱ-1 号矿体上盘围岩为灰岩、含泥灰岩和钙质板岩,矿体下盘基本为灰岩;矿体呈透镜状产出,近东西向展布,总体倾向北,产状为 $353^{\circ}\sim 13^{\circ}\angle 73^{\circ}\sim 83^{\circ}$ 。Au 品位为 $1.0\times 10^{-6}\sim 8.0\times 10^{-6}$,平均品位为 4.35×10^{-6} ,厚度较稳定,成矿后断裂对矿体影响较小,未见脉岩错断矿体的现象。



1. 第四纪坡积物;2. 灰岩;3. 钙质板岩;4. 构造角砾岩;
5. 蚀变带;6. 金矿体;7. 钻孔

图 2 王家坪金矿床Ⅱ-1 号矿体剖面地质图
(邵乐奇,2017)

Fig. 2 Section of No. 2-1 orebody of the Wangjiaping gold deposit

根据显微镜下鉴定,王家坪金矿矿石矿物组成较为简单。非金属矿物主要为方解石、石英、白云石、绢云母、绿泥石等;金属矿物主要为黄铁矿、雌黄、雄黄,其次为黝铜矿、辉锑矿、闪锌矿、方铅矿、毒砂、褐铁矿、自然金等(图 3),黄铁矿和雌黄是王家坪金矿床最主要的载金矿物;矿石结构主要为自形-半自形-他形粒状结构(图 3e、图 3f);矿石构造主要为角砾状构造(图 3b)、块状构造、脉状构造(图 3c)、星点状构造(图 3e),部分为稀疏浸染状、浸染状-稠密浸染状构造,少量为环带状构造、草莓构造;围岩蚀变比较普遍,主要有硅化、碳化、铁碳酸盐化;黄铁矿化、硅化、雌黄化与成矿关系最密切,其次是铁碳酸盐化、雄黄化。

根据矿床地质特征、脉体穿插关系、矿物共生组合及其结构构造特征,将王家坪金矿床成矿作用过程划分为早、中、晚 3 个主要阶段。

(1)石英硅化阶段(早阶段):为金矿化初始阶段,可见大规模的乳白色石英脉分布在断裂构造中,除少量黄铁矿外,未见金属硫化物(图 3a)。

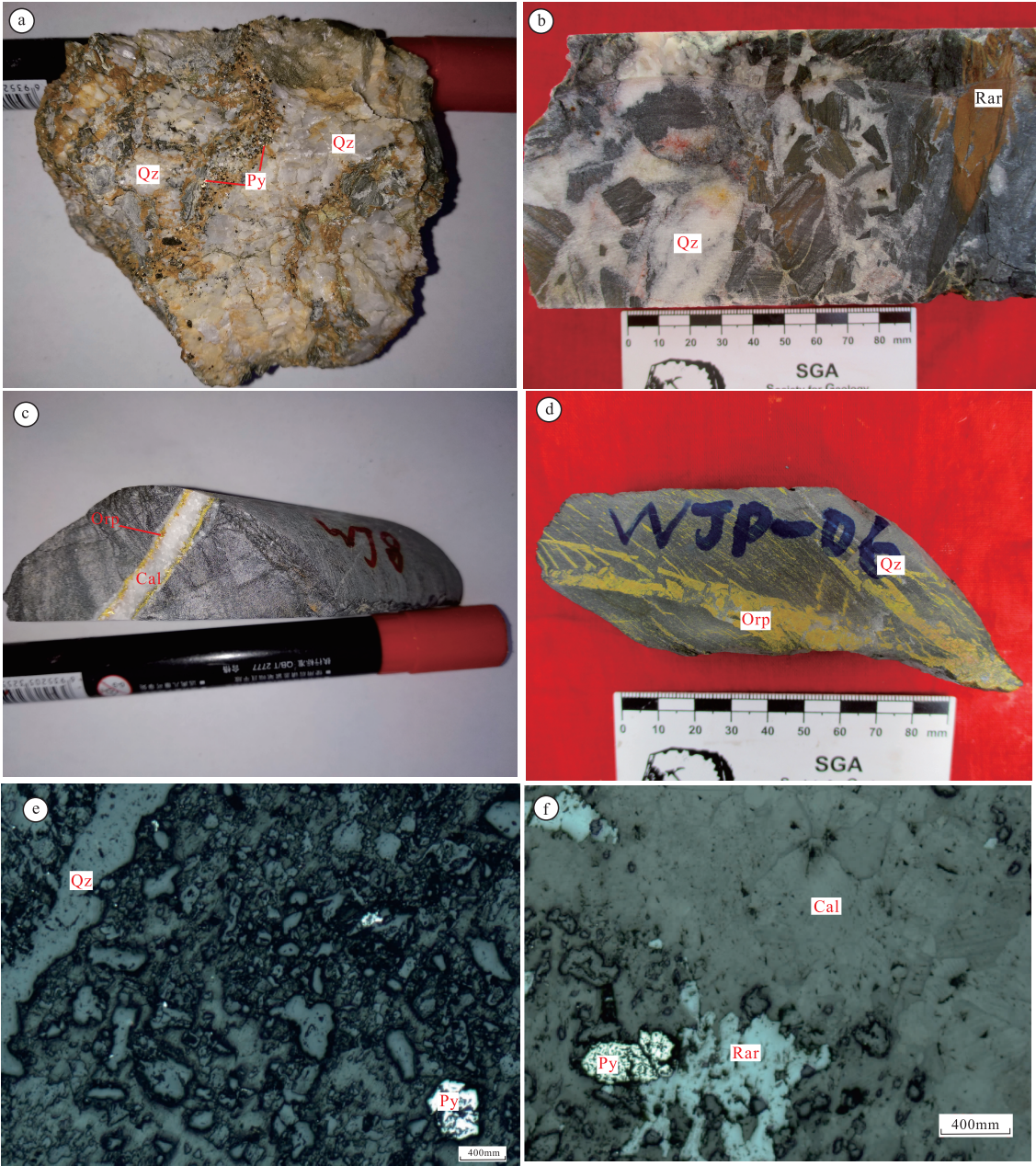
(2)石英-方解石-硫化物阶段(中阶段):是金矿化集中阶段,主要由石英、黄铁矿、方解石、雌黄和雄黄组成,可见少量的毒砂、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等矿物;脉体两侧地层蚀变较强,以硅化、雌黄化、黄铁矿化最为显著(图 3b、图 3c)。

(3)碳酸盐化阶段(晚阶段):代表着矿化结束,可见方解石及碳酸盐细脉交代主成矿阶段雌黄、雌黄、石英(图 3f)。

2 样品采集与分析方法

2.1 硫化物微量元素组成

本次样品分别采自王家坪金矿床 ZK3504 和 PD1036 坑道,矿石及围岩样品新鲜无风化现象。系统采集坑道及钻孔岩心成矿中、晚阶段的石英、黄铁矿和方解石脉样品 16 件。黄铁矿微量元素在北京科荟测试技术有限公司采用 LA-ICP-MS 进行原位测试分析,测试采用澳大利亚 Resolution Excimer 193 nm 准分子激光探针的 Nu Plasma 高分辨率多接受等离子质谱分析仪对硫化物进行多元素定量分析。分析过程中采取激光束斑直径为 35 μm ,重复的激光脉冲为 10 Hz,激光能量密度为 9.0 J/cm²进行斑点式剥蚀,以氦气为载气。每个样点的分析



a. 黄铁矿化石英砂岩; b. 雄黄化构造角砾岩; c. 雌黄化石英砂岩; d. 石英-雄黄脉; e. 石英-黄铁矿阶段; f. 方解石脉交代雌黄、石英; Orp. 雌黄; Py. 黄铁矿; Rar. 雄黄; Cal. 方解石; Qz. 石英

图 3 王家坪金矿床矿石组分特征及成矿阶段矿物特征图

Fig. 3 Ore composition characteristics and mineralogical characteristics of Wangjiaping gold deposit

时间为 60s,背景分析时间为 20s,样品连续剥蚀分析时间为 40s。测试过程中每剥蚀 10~15 个样品点后,以 2 个 NIST 610 及 2 个 MASS-1 标准样品作为外部标样来进行校正,以保证仪器的稳定性和数据准确性。采用 ICPMSDataCal 软件进行各元素含量计算。测试元素包括:Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Ag、Cd、Au、Al、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Hg、Tl、Pb、

Bi、In、Sn、Sb、W 等 24 种。

2.2 硫同位素特征

黄铁矿硫同位素原位微区分析都是在标准探针片上完成。硫同位素 LA-MC-ICPMS 原位测试分析在北京科荟测试技术有限公司进行,实验仪器为配备 Photon Machine Analyte G2 型激光探针和 Nu Plasam HR 高分辨率多接受等离子质谱分析

仪。所测元素采用的激光斑束直径为 30 μm 、频率为 4 Hz,激光能量密度为 3.4 mJ/cm^2 进行斑点式剥蚀,以氦气为载气,在气体以 0.41/min 气流速率运移至 ICP-MS 之前先同氦气均匀混合。每个样点的分析时间包括 20 s 背景分析和 50~60 s 的样品连续剥蚀,分析点位置都靠近硫化物微量元素原位分析点。

3 分析结果

3.1 黄铁矿微量元素组成

对王家坪金矿床不同成矿阶段的黄铁矿采用微量元素 LA-ICP-MS 测试分析,相关结果见表 1。在所分析的微量元素中,部分亲铜、亲铁元素(Ti、Se、Te、Cu、Co、Ni、As、Ag、Pb)的含量基本分布于仪器检测限之上。分析结果表明,王家坪金矿床中成矿中阶段(PyII)和晚阶段黄铁矿(PyIII)的微量元素含量存在较大差异。

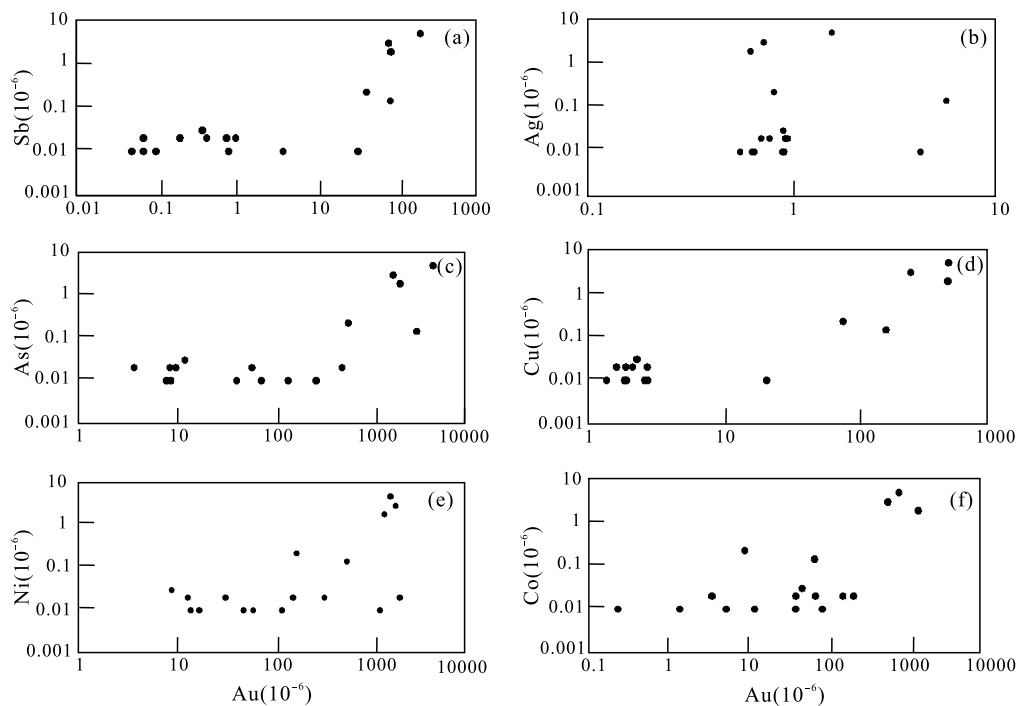
PyII 中 Au 含量为 $0.01 \times 10^{-6} \sim 4.73 \times 10^{-6}$,平均值为 1.22×10^{-6} ,As 含量为 $43.35 \times 10^{-6} \sim 4\,645.79 \times 10^{-6}$,平均值为 $1\,649.19 \times 10^{-6}$,Se 含量

为 $4.52 \times 10^{-6} \sim 22.07 \times 10^{-6}$,平均值为 11.73×10^{-6} ,Co 含量为 $0.24 \times 10^{-6} \sim 1\,637.93 \times 10^{-6}$,平均值为 426.25×10^{-6} ,Ni 含量为 $64.98 \times 10^{-6} \sim 2\,157.17 \times 10^{-6}$,平均值为 $1\,191.30 \times 10^{-6}$ 。

PyIII 中 Au 含量为 $0.006 \times 10^{-6} \sim 0.258 \times 10^{-6}$,平均值为 0.015×10^{-6} ,As 含量为 $3.79 \times 10^{-6} \sim 148.14 \times 10^{-6}$,平均值为 37.92×10^{-6} ,Se 含量为 $4.99 \times 10^{-6} \sim 8.71 \times 10^{-6}$,平均值为 7.55×10^{-6} ,Co 含量为 $1.48 \times 10^{-6} \sim 244.24 \times 10^{-6}$,平均值为 75.37×10^{-6} ,Ni 含量为 $9.28 \times 10^{-6} \sim 355.80 \times 10^{-6}$,平均值为 88.22×10^{-6} 。

总体来看,王家坪金矿床成矿中阶段和成矿晚阶段黄铁矿中相似的微量元素含量相差巨大,成矿中阶段黄铁矿中的 Au、Se、Co、Ni 和 As 含量均高于成矿晚阶段黄铁矿。

从黄铁矿元素的相关性图解中可知(图 4),Au 与 Cu、Co、Ni、As 和 Sb 呈较好的正相关关系,是由于金矿物与黝铜矿、硫铜锑矿等硫化物密切相关,而与 Ag 相关性不明显,表明 Au 的富集与含 Ag 显微包体关系不明显。



a. Au-Sb; b. Au-Ag; c. Au-As; d. Au-Cu; e. Au-Ni; f. Au-Co

图 4 王家坪金矿黄铁矿的部分微量元素相关性图解

Fig. 4 Correlation diagram of some trace elements in pyrite of the Wangjiaping gold mine

表 1 王家坪金矿床黄铁矿微量元素数据表(10⁻⁶)

Tab. 1 Trace element data of pyrite in the Wangjiaping gold deposit(10⁻⁶)

成矿阶段	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Co/Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Au	Tl	
PyI	W16.6	27.55	2.19	79.98	100.42	925.7	1 724.94	0.54	514.77	31.51	0.53	4.49	4 645.8	18.5	5.31	1.57	7.46	0.08	1.79	198.77	111.03	4.73	91.39
	W16.7	8.49	2.18	57.99	23.36	1 638	1 495	1.10	509	9.2	0.22	4.42	2 122	22.07	2.96	0.63	6.46	0.04	2.08	85.71	47.32	1.81	34.67
	W16.8	221.53	2.53	238.95	101.8	669.25	1 951.91	0.34	267.71	15.16	0.58	4.69	1 799.4	19.04	1.25	0.73	9.21	0.05	1.52	80.12	50.02	2.86	44.31
	W16.1	7.54	2.4	9.32	0.68	0.24	64.98	0.00	1.38	2.2	0.23	4.91	43.35	5.79	0.171	0.66	7.09	0.042	0.63	0.05	2.84	0.01	0.019
	W16.3	4.67	1.55	23.49	1.26	77.52	610.88	0.13	174.59	18.39	0.151	5.17	3 145.62	5.84	36	5.71	6.65	0.03	0.42	84.59	2.34	0.14	41.23
	W16.5	16.01	1.84	17.57	7.27	9.97	183.27	0.05	83.17	37.83	0.19	4.3	617.6	4.52	51.77	0.82	5.55	0.03	0.49	42.51	4.27	0.22	16.6
PyIII	W16.2	5.01	2.3	86.85	0.67	44.57	1 342.18	0.03	2.68	5.69	0.219	5.37	288.43	5.71	0.19	0.64	6.52	0.037	0.6	0.81	2.95	0.01	0.35
	W16.4	5.22	9.77	57.6	1.8	44.79	2 157.17	0.02	2.17	2.45	0.25	4.96	531.48	12.39	0.20	0.71	7.49	0.038	0.66	0.20	2.78	0.02	0.11
	W3.1	554.42	3.86	4.69	0.96	53.7	9.28	5.79	2.34	3.24	0.35	6.69	12.69	8.43	0.43	0.91	9.11	0.064	0.9	0.38	6.08	0.03	0.01
	W3.2	7.88	3.44	12.24	1.34	178.6	33.54	5.32	1.93	4.73	0.32	6.87	62.39	8.4	0.38	0.93	8.94	0.055	0.9	0.43	4.15	0.02	0.01
	W3.3	5.93	3.5	4.95	1.43	3.8	168.39	0.02	2.8	3.34	0.34	6.33	8.85	8.71	0.29	0.96	9.13	0.055	0.93	0.99	3.99	0.02	0.01
	W3.4	5.74	4.07	7.59	20.6	1.48	17.93	0.08	22.07	8.01	2.04	23.56	148.14	4.99	0.14	4.27	5.69	0.059	0.55	33.29	2.44	0.01	4.66
	W3.5	5.97	3.83	4.92	0.99	97.54	51.64	1.89	1.95	4.5	0.32	6.26	8.15	7.89	0.25	0.92	10.87	0.055	0.87	0.1	3.97	0.01	0.02
	W3.6	7.62	3.4	4.79	0.98	244.24	355.8	0.69	1.93	4.86	0.33	6.32	3.79	7.9	0.23	0.93	9.25	0.06	0.9	0.76	4.09	0.02	0.01
	W37	3.95	2.09	6.79	46.81	13.28	129.22	0.10	2.83	9.11	2.94	86.69	78.01	5.97	0.195	0.56	9.78	0.85	0.55	3.86	2.41	0.01	1.20
W3.8	6.32	3.3	8.56	0.95	5.77	14.59	0.40	1.89	3.25	0.32	4.36	9.09	8.27	0.27	0.90	8.97	0.05	0.87	0.07	3.79	0.01	0.02	
W3.9	17.27	2.84	23.7	0.83	79.91	13.62	5.87	1.64	5.3	0.28	5.73	10.2	7.41	0.227	0.78	7.98	0.05	0.75	0.07	3.29	0.02	0.01	

3.2 硫同位素组成

王家坪金矿床矿石及围岩的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分析结果见表 2、图 5。

研究区矿石矿物以黄铁矿和雄黄为主,矿物组合较简单,故矿区黄铁矿和雄黄的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值可代

表成矿热液的硫同位素组成。矿石中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-28.5\text{‰}\sim 20.33\text{‰}$,平均值为 3.85‰ ,极差为 48.83‰ ;一件雄黄样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 1.71‰ 。围岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $5.32\text{‰}\sim 28.07\text{‰}$,平均值为 20.33‰ 。

表 2 王家坪金矿床矿石、围岩硫化物的硫同位素组成表(‰)
Tab.2 Sulfur isotope composition of ore /surrounding rocksulfide in Wangjiaping gold deposit (‰)

样品号	样品描述	成矿阶段	测定矿物	$\delta^{34}\text{S}$	数据来源
B56#	矿体	I	黄铁矿	12.8	MA,2018
B57#	矿体	I	黄铁矿	8.9	MA,2018
WJ-16-7	矿体	I	黄铁矿	-2.78	本文数据
Wt-01*	矿体	I	黄铁矿	8.55	邵乐奇,2017
Wt-02*	矿体	I	黄铁矿	10.91	邵乐奇,2017
Wt-04*	矿体	I	黄铁矿	7.20	邵乐奇,2017
Wt-05*	矿体	I	黄铁矿	-1.51	邵乐奇,2017
Wt-07*	矿体	I	雄黄	0.19	邵乐奇,2017
Wt-10*	远矿围岩	—	黄铁矿	28.07	邵乐奇,2017
Wt-11*	蚀变围岩	—	黄铁矿	5.32	邵乐奇,2017
B60#	远矿围岩	—	黄铁矿	27.6	MA,2018
WJ-16-1	矿体	II	黄铁矿	-28.40	本文数据
WJ-16-1'	矿体	II	黄铁矿	-26.66	
WJ-16-4	矿体	II	黄铁矿	-20.16	
WJ-16-5	矿体	II	黄铁矿	-19.95	
WJ-16-6	矿体	II	黄铁矿	-28.50	
WJ-3-1	矿体	III	黄铁矿	17.16	本文数据
WJ-3-2	矿体	III	黄铁矿	20.01	
WJ-3-3	矿体	III	黄铁矿	13.92	
WJ-3-4	矿体	III	黄铁矿	16.56	
WJ-3-5	矿体	III	黄铁矿	17.12	
WJ-3-6	矿体	III	黄铁矿	17.60	
WJ-3-7	矿体	III	黄铁矿	11.91	
WJ-3-8	矿体	III	黄铁矿	17.50	
WJ-3-9	矿体	III	黄铁矿	17.71	
WJ-16-2	矿体	III	黄铁矿	20.33	
WJ-16-3	矿体	III	黄铁矿	20.26	

矿床中黄铁矿的硫同位素组成变化很大,该矿床的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-28.5\text{‰}\sim 20.33\text{‰}$,平均值为 5.66 ,各个成矿阶段硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值略有不同。其中,成矿早阶段黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-1.51\text{‰}\sim 12.8\text{‰}$,平均值为 7.81‰ ,极差为 13.31‰ ;一件雄

黄样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 1.71‰ 。成矿中阶段黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-28.5\text{‰}\sim -19.95\text{‰}$,平均值为 -24.73‰ ,极差为 8.55‰ 。成矿晚阶段黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $11.91\text{‰}\sim 20.33\text{‰}$,平均值为 16.98‰ ,极差为 8.42‰ 。

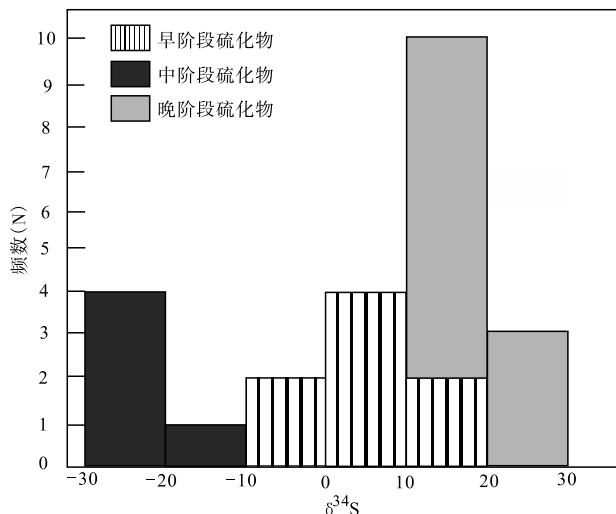


图 5 王家坪金矿床硫同位素直方图

Fig. 5 Sulfur isotope histogram of Wangjiaping gold deposit

4 讨论

4.1 黄铁矿成因

对于金属矿床常用矿石或硫化物中的 Co、Ni 含量及 Co/Ni 值作为矿床分类的根据,Co、Ni 含量及 Co/Ni 值的变化可指示矿床成因类型及成矿作用。

前人研究显示,沉积成因黄铁矿中 Co/Ni 值 < 1,岩浆成因黄铁矿的 Co/Ni 值多 > 5,岩浆热液成因黄铁矿的 Co/Ni 值为 1~5,变质热液成因的黄铁矿 Co/Ni 值更接近于沉积成因的黄铁矿,一般 < 1,与火山岩有关的矿床中黄铁矿 Co、Ni 含量较高,Co/Ni 值一般都大于 5 (Middlemost, 1994; Thomas et al., 2011; 杜亚龙等, 2017)。

通过对比发现,王家坪金矿床中成矿中、晚阶段的 Co、Ni 含量组成不尽相同。成矿中期黄铁矿中 Co、Ni 含量较高,Co 含量为 $0.24 \times 10^{-6} \sim 1.637.93 \times 10^{-6}$,平均值为 426.25×10^{-6} ,Ni 含量为 $64.98 \times 10^{-6} \sim 2.157.17 \times 10^{-6}$,平均值为 $1.191.30 \times 10^{-6}$; $0.003 < \text{Co/Ni} < 1.1$,平均值为 0.28。表明该阶段黄铁矿主要为沉积成因,有少量黄铁矿可能与岩浆作用相关。柞水-山阳矿集区整体缺失中生代沉积地层,沉积成因的黄铁矿可能为区域变质基底中残留,推测该期黄铁矿为岩浆成因。

成矿晚期黄铁矿中 Co 含量低,为 $1.48 \times 10^{-6} \sim 244.24 \times 10^{-6}$,平均值为 75.37×10^{-6} ,而黄铁矿中 Ni 含量较高,为 $9.28 \times 10^{-6} \sim 355.80 \times 10^{-6}$,平均值为 88.22×10^{-6} , $0.02 < \text{Co/Ni} < 5.87$,平均值为 2.24,黄

铁矿成因与岩浆作用和沉积作用有关。因此,王家坪金矿床黄铁矿 S 源来自深部岩浆和沉积地层。

4.2 成矿物质来源

自然界硫同位素主要有 3 个储存库:一是幔源硫或岩浆硫, $\delta^{34}\text{S}$ 值通常为 $0 \pm 3\%$;二是海水硫,现代海水 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近于 20% ;三是沉积物中的还原硫,该类 $\delta^{34}\text{S}$ 值极差大且具有较大的负值, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-40\% \sim +50\%$ (邢波等, 2016)。

王家坪金矿床早阶段硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值基本落在陨石硫范围内,显示出岩浆硫特征;而中阶段的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围小,出现较大负值,表明该阶段的硫具有多来源的特点;晚阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($\delta^{34}\text{S} = 11.91\% \sim 20.33\%$,平均值为 16.98%) 低于围岩 ($\delta^{34}\text{S} = 5.32\% \sim 28.07\%$,平均值为 20.33%),可能成矿物质中有赋矿围岩的加入。综上所述,成矿物质可能来源于深部岩浆,有地壳物质的加入,显示混合来源特征。

4.3 矿床成因

秦岭造山带是一个经历了多期构造-岩浆热作用的复合大陆碰撞造山带,蕴藏着丰富的金矿,成矿潜力巨大,引起了国内外学者广泛关注和研究。不同学者将该地区金矿床成因类型主要分为造山型、卡林型、类卡林型 3 种。陈衍景等 (2004) 依据赋矿围岩和成矿元素相似性、成矿温度、流体盐度、压力及成矿深度等方面,认为秦岭地区金矿与内华达卡林-类卡林型金矿一致。Mao 等 (2002) 根据赋矿围岩时代和空间关系认为秦岭北部地区的金矿矿体与典型的造山型金矿特征相似,秦岭南部金矿主要表现为构造控矿的微细浸染状矿化特征。柞-山矿集区金矿床从南到北有 2 条金矿带:沿山阳-凤镇断裂南侧分布有二台子-凤镇-夏家店卡林-类卡林型金矿带 (王瑞廷等, 2008; 方维萱等, 2013),山阳-凤镇断裂北侧分布有青林沟-王家沟-庙梁金矿带。位于青林沟-王家沟-庙梁成矿带中的大西沟-银洞子金银多金属矿田外围为类卡林型金矿分布区 (方维萱等, 2013)。例如,青林沟、下梁子和王家沟等卡林-类卡林型金矿床。

王家坪金矿矿石主要为蚀变沉积岩型,金属矿物主要为黄铁矿,其次为雌黄、雄黄;非金属矿物主要有石英、方解石,其次为白云母、绢云母、绿泥石;多为微细浸染状角砾状、碎裂状构造;与金成矿关系密切的蚀变为硅化、方解石化和雌黄、雄黄化。通过与全球范围类典型的卡林型金矿床、造山型金矿及类卡林型金矿对比可知 (表 3),王家坪金矿赋存在

表 3 造山型金矿床、卡林型金矿床、类卡林型金矿床、王家坪金矿床地质和成矿流体特征对比表
Tab. 3 Comparison of geological and metallogenic fluid characteristics of Orogenic gold deposit, Carlin type gold deposit, Carlin-like gold deposit and Wangjiaping gold deposit

对比项目	造山型金矿床	卡林型金矿床	类卡林型金矿床	王家坪
构造背景	造山带	弧后伸展区或造山带	碰撞造山带	弧前盆地
赋矿围岩	变质地体	沉积地体	浅变质沉积建造	沉积地体
岩性控制	任意岩性	钙质粉砂岩	碳质千枚岩、钙质粉砂岩、花岗斑岩	含碳泥质灰岩与钙质板岩
控矿构造	次级脆-韧性剪切带	层间或正断层	剪切带和层间断层	层间断裂
矿区岩体	常见	不常见	常见	不常见
矿体形态	脉状、透镜状	脉状、浸染状	脉状,似层状	脉状、浸染状
矿体边界	与围岩边界清楚	与围岩边界模糊	与围岩边界模糊	与围岩边界模糊
矿石类型	石英脉、蚀变岩	蚀变的沉积岩	石英脉、蚀变千枚岩和蚀变花岗斑岩	蚀变沉积岩
矿物组合	以黄铁矿为主,次为自然金、毒砂、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿	以黄铁矿和毒砂为主、次为含砷黄铁矿、辰砂、雄黄、雌黄、自然砷、辉铋矿	以黄铁矿和毒砂为主、次为磁黄铁矿、钛铁矿、辉铋矿	以黄铁矿为主,次为雌黄、雄黄
脉石矿物	石英、绿泥石、斜长石、方解石、铁白云石、绢云母、电气石	石英、绢云母、方解石等	铁白云石、石英、白云母、绢云母、方解石等	主要为方解石,其次为石英、绢云母、绿泥石等
蚀变类型	硅化、绿泥石化、黑云母化、钠长石化、电气石化及碳酸盐化	硅化、黄铁矿化、绢云母化及碳酸盐化	硅化、黄铁矿化、菱铁矿化、绢云母化及碳酸盐化	黄铁矿化、硅化、雌黄化、碳化、铁碳酸盐化、雄黄化和少量辉铋矿化、黄铜矿化和白钨矿化
矿化元素组合	Au, Ag(±As, Sb, Te, W, Mo, Bi, B)	Au-As-Sb-Hg-Tl±Se	Au-Cu-Pb-Zn-Bi-Ti	Au、As、Hg、Sb
自然金粒度	较粗,可见明金	较细,无明金	较细,偶见明金	较细,无明金
包裹体类型	CO ₂ , 含 CO ₂ 水溶液	水溶液	CO ₂ , 含 CO ₂ 水溶液	
流体 CO ₂ 含量	10%~25%	<10%	>7%	
流体盐度	<6%NaCl	<8%NaCl	<5%NaCl	<4.6%NaCl
流体来源	变质流体为主	岩浆流体+大气降水	岩浆流体±建造水±变质水	岩浆流体+大气降水
物质来源	地层土岩浆源	岩浆源±地层源	岩浆源	岩浆源±地层源
主成矿温度	200~500℃	160~250℃	139~375℃	90~250℃
成矿压力	50~400 MPa	25~65 MPa	35~222 MPa	82~179 MPa
流体不混容	有	无	有	
参考文献	Kerrich et al., 2000; 陈衍景, 2006	Kerrich et al., 2000; Hofstra et al., 2000; Cline et al., 2013	孙树浩等, 2008	邵乐奇, 2017

沉积建造中,金以不可见金为主,成矿温度为中-低温环境,成矿物质以岩浆热液为主,混入少量围岩,其在地质背景、赋矿围岩及成矿流体来源等方面与内华达卡林型金矿相似。综上所述,笔者研究认为,柞-山矿集区王家坪金矿具与岩浆热液密切相关的卡林型金矿床的特征属性。

5 结论

(1)王家坪金矿床赋矿围岩主要为不纯碳酸盐岩,矿体明显受断裂构造控制,与 Au、As、Hg、Sb 等元素密切共生;金属矿物为黄铁矿、雌黄、雄黄;非金属矿物主要有石英、方解石、白云母、绢云母、绿泥石等;矿石多呈微细浸染状角砾状、碎裂状构造;与金成矿关系密切的蚀变为硅化、方解石化和雌黄、雄黄化,类似于卡林型金矿床。

(2)王家坪金矿床早阶段硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-1.51\text{‰} \sim 12.8\text{‰}$,基本落在陨石硫范围内,显示出岩浆硫特征;而 PyII 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围小,为 $-28.5\text{‰} \sim -19.95\text{‰}$,具有多来源的特点;PyIII 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布在 $11.91\text{‰} \sim 20.33\text{‰}$,显示 PyIII 中有赋矿围岩的加入。

(3)在前人研究的基础上,结合黄铁矿微量元素组成,认为该矿床成矿中阶段黄铁矿中的 Au、Se、Co、Ni 和 As 含量均高于成矿晚阶段黄铁矿,黄铁矿的 Co、Ni 含量组成暗示其成因与岩浆作用和沉积作用有关。

参考文献(References):

陈衍景,张静,张复新,等. 西秦岭地区卡林一类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. 地质论评, 2004,50(2):134-152.

CHEN Yanjing, ZHANG Jing, ZHANG Fuxin, et al. Carlin like gold deposits and their metallogenic time, tectonic setting and model in West Qinling area [J]. Geological Review, 2004, 50(2): 134-152.

杜亚龙,李智明,王继斌,等. 新疆西天山卡特巴阿苏金矿黄铁矿地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质,2017,50(1):239-248.

DU Yalong, LI Zhiming, WANG Jibin, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Pyrite in Katbaasu Gold Deposit, Western Tianshan, Xinjiang [J]. Northwestern Geology, 2017,50 (1): 239-248.

樊忠平,任涛,原莲肖,等. 南秦岭东段早寒武世黑色岩系金钼成矿特征与找矿方向—以夏家店矿床为例[J]. 西北地质,2007,3(2): 85-94.

FAN Zhongping, REN Tao, YUAN Lianxiao, et al. Gold and vanadium mineralization characteristics and prospecting direction of Early Cambrian black rock series in the eastern part of South Qinling Mountains: a case study of Xiajiadian deposit [J]. Northwestern Geology, 2007, 3 (2): 85-94.

戚继福,李岩,范书义. 大兴安岭中段铜多金属矿床矿物微量元素研究[J]. 矿床地质,1999, 18(2): 57-64.

QI Jifu, LI Yan, FAN Shuyi. Study on mineral trace elements of copper polymetallic deposit in the middle part of Daxinganling[J]. Geology Deposits, 1999, 18(2): 57-64.

冯益民,曹宣铎,张二朋,等. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. 西北地质,2003,36(1):1-10.

FENG Yimin, CAO Xuanduo, ZHANG Erpeng, et al. Evolution, tectonic framework and nature of the West Qinling orogenic belt [J]. Northwestern Geology, 2003, 36 (1): 1-10.

方维萱,刘家军. 陕西柞-山-商晚古生代拉分断陷盆地动力学与成矿作用[J]. 沉积学报,2013,31(2): 193-209.

FANG Weixuan, LIU Jiajun. Dynamics and mineralization of Zhashan Shang late Paleozoic pull apart fault basin in Shaanxi [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31 (2): 193-209.

胡西顺,刘新伟,汪超,等. 陕西省山阳县王家坪金矿的发现及其地质意义[J]. 矿床地质,2012,31(S1):741-742.

HU Xishun, LIU Xinwei, WANG Chao, et al. Discovery of Wangjiaping gold deposit in Shanyang County, Shaanxi Province and its geological significance[J]. Geology Deposits, 2012, 31 (S1): 741-742.

刘新伟,汪超,韩璐,等. 王家坪金矿床地质地球化学特征及成因探讨[J]. 黄金科学技术,2016,24(4):39-46.

LIU Xinwei, WANG Chao, HAN Lu, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of wangjiaping gold deposit [J]. Gold Science and Technology, 2016, 24 (4): 39-46.

李建新,黄勇,赵春华,等. 黄铁矿原位硫同位素和微量元素对西南泥堡卡林型金矿形成演化的制约作用[J]. 中国学报地球化学,2019,38(4):555-575.

LI Jianxin, HUANG Yong, ZHAO Chunhua, et al. In-situ sulfur isotope and trace element of pyrite constraints on the formation and evolution of the Nibao Carlin-type gold deposit in SW China[J]. Acta Geochimica, 2019, 38(4): 555-575.

宁磊. 陕西山阳—柞水矿集区龙头沟金矿矿床成因及地球动力学背景研究[D]. 北京:中国地质大学(北京)2015.

NING Lei. Genesis and geodynamic background of Longto-

- ugou gold deposit in Shanyang-Zhashui ore concentration area, Shaanxi Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- 邵乐奇. 陕西省山阳县王家坪金矿床地质特征和成矿机制探讨[D]. 西安:长安大学, 2017.
- SHAO Leqi. Geological characteristics and metallogenic mechanism of Wangjiaping gold deposit in Shanyang County, Shaanxi Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- 孙树浩. 中国川北甘南类卡林型金矿床[M]. 北京:冶金工业出版社, 2009.
- SUN Shuhao. Carlin like gold deposits in Gannan, northern Sichuan, China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- 田涛,王瑞廷,张革利,等. 陕西凤太矿集区东塘子铅锌矿床地质-地球化学特征与成因[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(5): 520-534.
- TIAN Tao WANG Ruiting, ZHANG Geli, et al. Geological-geochemical Characteristics and Genesis of Dongtangzi Pb-Zn Deposit in Fengxian-Taibai Ore Concentration Area of Shaanxi, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(5): 520-534.
- 丁坤,王瑞廷,刘凯,等. 南秦岭柞水-山阳矿集区龙头沟金矿床硫化物微量元素和硫同位素地球化学特征[J]. 地质与勘探, 2021, 57(5): 969-980.
- DING Kun, WANG Ruiting, LIU Kai, et al. Sulfide trace elements and sulfur isotope geochemistry of the Longtougou gold deposit, Zhashui-Shanyang ore district, South Qinling[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(5): 969-980.
- 王宗起,闫臻. 秦岭晚古生代弧前增生的背驮型盆地体系[J]. 地质通报, 2002, 21(9): 456-464.
- WANG Zongqi, YAN Zhen. A piggyback basin system with pre arc accretion in Late Paleozoic Qinling Mountains [J]. Geological Bulletin, 2002, 21(9): 456-464.
- 王宗起,闫全人,闫臻,等. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1527-1546.
- WANG Zongqi, YAN Quanren, YAN Zhen, et al. New division of main tectonic units in Qinling orogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(11): 1527-1546.
- 王瑞廷,李剑斌,任涛,等. 柞水-山阳多金属矿集区成矿条件及找矿潜力分析[J]. 中国地质, 2008, 35(6): 1291-1298.
- WANG Ruiting, LI Jianbin, REN Tao, et al. Analysis of metallogenic conditions and prospecting potential of Zhashui Shanyang polymetallic ore concentration area [J]. Geology in China, 2008, 35(6): 1291-1298.
- 吴发富. 中秦岭山阳-柞水地区岩浆岩及其成矿构造环境研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2013.
- WU Fafu. Study on magmatic rocks and their metallogenic tectonic environment in Shanyang Zhashui area, central Qinling Mountains [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013.
- 邢波,郑伟,欧阳志侠,等. 粤西庙山铜多金属矿床硫化物原位微区分析及 S 同位素对矿床成因的制约[J]. 地质学报, 2016, 90(5): 971-986.
- XING Bo, ZHENG Wei, OUYANG Zhixia, et al. In situ microanalysis of sulfide in Miaoshan copper polymetallic deposit in western Guangdong Province and the restriction of s isotopes on the genesis of the deposit [J]. Acta Geology Sinica, 2016, 90(5): 971-986.
- Bajwah Z U, Seccombe P K, Offler R. Trace element distribution, Co: Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. Mineral Deposita, 1987, 22(4): 292-300.
- Boden D R, Henry C D. Eocene magmatism: The heat source for Carlin-type gold deposits of northern Nevada [J]. Geology, 1998, 26(12): 1067-1070.
- Bull S W, Thomas H V, Large R R. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia; Insights for ore genesis [J]. Economic Geology, 2011, 106(1): 1-31.
- Cline J S, Hofstra A H, Muntean J L, et al. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models. Econ. Geol [J]. 100th Anniversary Volume, 2005, 451-484.
- Cline J S, Muntean J L, Simon A C, et al. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(1): 122-127.
- Hofstra A H and Cline J S. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits [A]. In: Vikre P, Thompson T B, Bettles K, Christensen O, Parratt R, eds. Gold in 2000, Society of Econ [C]. Geol. Reviews, 2000, 13: 163-220.
- Kerrick Robert, Richard Goldfarb, David Groves, et al. The characteristics, origins and geodynamic setting of supergiant gold metallogenic provinces [J]. Science China Earth Sciences, 2000, 43: 1-68.
- Escolme A, Ma J, Lü X B, et al. In-situ sulfur isotope analysis of pyrite from the Pangjiahe gold deposit: implications for variable sulfur sources in the north and south gold belt of the South Qinling Orogen [J]. Ore Geology Reviews, 2018, 98: 38-61.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock mass system [J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37: 215-224.
- Mao J W, Qiu Y M, Goldfarb R J, et al. Geology, distribution and classification of gold deposits in the western Qinling belt, central China [J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 352-377.