

闽中丁家山铅锌矿床同位素地球化学及其地质意义

石得凤¹, 张术根², 韩世礼², 徐忠发³

(1 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2 中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 3 华东有色地质调查集团, 江苏 南京 210007)

摘要 通过铅、硫、铷、锶同位素地球化学特征的系统分析, 对闽中丁家山铅锌矿床的成矿物质来源、成矿时代及矿床成因进行了深入研究。围岩全岩及矿石内方铅矿的 Pb 同位素变化范围较宽, 方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 18.182~18.605 之间, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 15.010~15.932 之间, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 38.331~39.666 之间, 具有明显的壳-幔混合来源特征, 可能由龙北溪组地层和燕山期重熔型花岗岩共同提供。黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成为 $-1.7\text{‰} \sim 5.6\text{‰}$, 平均值为 2.7‰ , 具有向正值偏移的塔式分布特征, 系统 $\delta^{34}\text{S}$ 初始值为 3.97‰ , 深源硫特征明显, 说明硫由燕山期重熔型花岗岩提供。成矿期的石英-铷-锶等时线年龄为 $(146.15 \pm 3.95) \text{ Ma}$, 成矿时间属燕山早期第三阶段。以上结果进一步证实, 丁家山铅锌矿床为马面山群龙北溪组上段经区域变质的富钙质沉积岩与燕山期重熔型花岗岩发生接触交代作用, 形成的矽卡岩型矿床。

关键词 地球化学; 成矿物质来源; 成矿时代; 矽卡岩型矿床; 丁家山铅锌矿

中图分类号: P597

文献标志码: A

Isotope geochemistry of Dingjiashan Pb-Zn deposit in central Fujian Province and its geological significance

SHI DeFeng¹, ZHANG ShuGen², HAN ShiLi² and XU ZhongFa³

(1 School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2 MOE Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3 East China Geological Survey(Group) Co. Ltd., Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract

Based on a systematic study of Pb, S, Rb and Sr isotope geochemistry, this paper deals with the sources of ore-forming materials, metallogenic epoch and genetic type of the Dingjiashan Pb-Zn ore district in Fujian Province. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios are 18.182~18.605, 15.010~15.932, and 38.331~39.666 respectively. The wide ranges of Pb isotopes indicate that Pb was derived from the mantle and the crust. Neoproterozoic Mamianshan Formation of Longbeixi Group and Yanshanian remelted granite might have jointly served as the sources. The $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite, pyrrhotite, sphalerite, galena are $-1.7\text{‰} \sim 5.6\text{‰}$, 2.7‰ on average, characterized by tower-shaped distribution shifting to the positive value. The $\delta^{34}\text{S}$ initial value of the metallogenic system is 3.97‰ , obviously suggesting deep-sourced sulfur characteristics. These data imply that sulfur was supplied by Yanshanian remelted granite. Rb-Sr isochron of quartz reveals that the ore-forming process occurred at $(146.15 \pm 3.95) \text{ Ma}$, in late Jurassic period, belonging to the third stage of

early Yanshanian. It is thus held that the Dingjiashan Pb-Zn ore district is a skarn ore deposit resulting from the contact metasomatism between the Yanshanian remelted granite and the regional metamorphosed calcareous rock in Longbeixi Formation of Mamianshan Group.

Key words: geochemistry, source of ore-forming materials, metallogenic epoch, skarn type ore deposit, Dingjiashan Pb-Zn ore district

随着梅仙丁家山和峰岩、建阳水吉、建瓯八洋外、南平后坪、屏南黛溪、顺昌山后、宁化溪源等多个大中型铅锌银矿床的发现,闽中地区的铅锌矿产勘查及研究备受关注。丁家山铅锌矿床是由中国有色工业总公司华东有色地质勘查局于 1992 年通过地表和深部探矿工程揭露发现的,随后两次共历时十年(1992~2002)对其进行了详细的地质勘查工作,基本查明了矿区地质、矿体产状及品位变化等特征,并计算获得近 21 000 t 的铅锌金属量(华东有色地质矿产勘查开发院,2002)。

目前,对丁家山铅锌矿床的成因认识仍然存在分歧。矿山发现初期,丁家山矿床被划入接触交代型(闽西地质队,1977),而后该矿床被众多学者划入块状硫化物矿床大类中,徐克勤等(1996)认为矿区为细碧角斑岩容矿型块状硫化物矿床(属广义 VMS 型),叶水泉等(1999)认为丁家山铅锌矿床是介于沉积岩容矿型块状硫化物矿床(SEDEX 型)与火山岩容矿型块状硫化物矿床(VMS 型)之间的过渡类型,并以其为代表提出“梅仙式”块状硫化物矿床的概念,周兵等(1999)认为它是介于华南型和 Besshi 型间的过渡型块状硫化物矿床。然而,近年有学者研究发现,包括丁家山在内的闽中地区铅锌矿床中的辉石为具有远温端矽卡岩特征的透辉石和钙铁辉石(狄永军等,2006)。本文作者通过对赋矿围岩原岩的恢复、典型矿物标型特征、典型矿物富集型异常填图研究及成矿系统分析后,提出丁家山铅锌矿床为接触交代型矿床(张术根等,2011;2012;石得凤,2012;石得凤等,2012a;2012b)。

本文在详细的野外地质观察及室内分析研究的基础上,着重对丁家山铅锌矿床内方铅矿及围岩的铅同位素组成、各类硫化物的硫同位素组成、同成矿期石英的铷-锶同位素组成开展研究,旨在深入分析丁家山铅锌矿成矿物质来源与成矿时代,为矿床成因认识提供证据。

1 矿区地质

丁家山铅锌矿床的地理位置位于尤溪县城北约 13 km 处,属尤溪县梅仙镇管辖,大地构造位置处于华南褶皱系之武夷-云开褶皱带的东北段(图 1)。梅仙地区主要出露新元古界马面山群龙北溪组($P_{t_{2-3}l}$)和大岭组($P_{t_{2-3}dl}$)、侏罗系长林组(J_{3c})地层。侏罗系呈断层或角度不整合覆盖在新元古界马面山群地层之上。马面山群地层在该区形成复背斜构造,背斜核部由龙北溪组地层组成,两翼由大岭组地层组成。区内有丁家山、经济坑、关兜等多个铅锌矿床。

丁家山铅锌矿区内,马面山群龙北溪组由上段的石榴子石-透辉石-绿帘石系列变质岩及夹于其中的大理岩团块和中段的云母石英片岩及大理岩夹层组成,大岭组则由变质石英砂岩、石英岩、千枚状粉砂岩、千枚岩、绢云母片岩等组成。侏罗系长林组由泥质粉砂岩、砂砾岩、凝灰质细砂岩、安山岩及安山玄武岩等组成。

区内燕山期中酸性岩浆侵入活动强烈,燕山期侵入的重熔型花岗岩主要沿北东向呈串珠状岩株体分布在关兜—丁家山一线以西地区,而其以东地区,则仅见北东向花岗斑岩及石英斑岩的岩墙和岩脉。区内断裂构造发育,主要有 NE 向、NW 向、SN 向、EW 向 4 组。部分 NE 向和 NW 向断裂控制了燕山期花岗岩及中酸性脉岩的侵入,也控制着部分铅锌硫化物矿体的就位。而 SN 向、EW 向断裂往往造成矿体或地层的局部错位。

区内变质作用主要有区域变质和接触交代变质 2 类。区域变质主要发生在加里东期,形成云母-石英系列片岩、阳起石石英片岩、阳起石透闪石石英片岩等一系列片岩类和大理岩、白云质大理岩及硅质大理岩等碳酸盐岩类岩石。接触交代变质作用主要

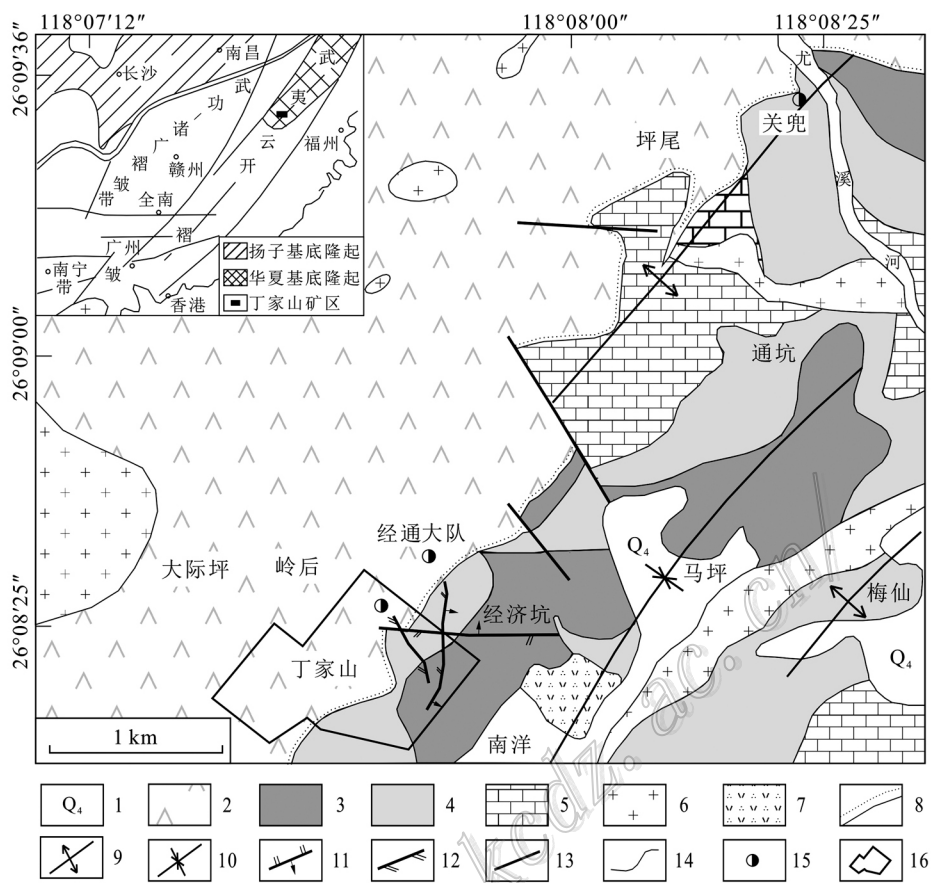


图 1 丁家山矿区及其外围地质略图(据石得凤,2012 修改)

1—第四系；2—上侏罗统长林组；3~5—新元古界马面山岩群：3—大岭组；4—龙北溪组上段；5—龙北溪组中段；6—花岗岩；7—石英斑岩；8—角度不整合界线；9—背斜；10—向斜；11—逆断层；12—压扭性断层；13—性质不明断层；14—地质界线；15—铅锌矿点；16—丁家山矿区范围

Fig. 1 Geological sketch map of the Dingjiashan ore district and its peripheral areas (modified after Shi, 2012)
1—Quaternary; 2—Upper Jurassic Changlin Formation; 3~5—Upper Proterozoic Mamianshan Group: 3—Daling Formation, 4—Upper Longbeixi Formation, 5—Middle Longbeixi Formation; 6—Granite; 7—Quartz porphyry; 8—Unconformity; 9—Anticline; 10—Syncline; 11—Reversed fault; 12—Compresso-shear fault; 13—Unclear fault; 14—Geological boundary; 15—Pb-Zn ore district; 16—Limits of the Dingjiashan Pb-Zn ore deposit

发生在燕山期花岗质岩浆侵入期间，花岗质岩浆与马面山群龙北溪组上段经加里东期区域变质的富钙质沉积岩发生接触交代作用，形成以石榴子石、透辉石、绿帘石为主要造岩矿物的矽卡岩。

丁家山铅锌矿床中规模大、品位高的矿体主要赋存在马面山群龙北溪组上段石榴子石-透辉石-绿帘石系列变质岩中，矿石中的非金属矿物主要为绿帘石、透辉石、石榴子石、硅灰石、阳起石和石英等，金属矿物主要为磁铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和少量黄铜矿。矿体主要呈似层状沿龙北溪组上段地层产出，但部分矿体也表现出明显的切层分布特征。此外，侏罗系内部及其与马面山群的不整合接触界面上也分布有小规模矿体。对比不同部

位的矿体可以看出，虽然赋矿围岩的层位、岩性、就位部位明显不同，但蚀变类型和矿物组合并无大的差异，甚至几乎完全相同。这说明研究区内不同层位上的矿体，是相同成矿系统在不同矿化网络结点上形成的产物(石得凤等,2012b)。

2 样品分析及测试结果

2.1 样品采集及处理

本文所有的 Pb 同位素数据及部分 S 同位素数据来源于资料(华东地质勘查局矿产勘查开发院, 1995; 丰成友等, 2007), 笔者仅对数据进行了二次应用与分析。其他样品均由笔者亲自采集并处理。

笔者所采样品遍及丁家山铅锌矿 30 m、50 m、70 m、90 m 四个中段的各个矿体,还包括少量地面捡样。受井下工作条件的限制,所采样品以 90 m 中段 I-3、I-4、II、III-1、III-2 号矿体内的样品为主。样品新鲜无氧化,经表面清洗、晾干、粉碎后,对 60~80 目间的样品进行淘洗和低温烘干后,在双目镜下挑选纯度>98% 的闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿、石英等单矿物,以备硫同位素及铷-锶同位素测定。其中的石英样品在挑选后,用浓度为 5% 的稀盐酸进行了清洗,以除去与石英连生的方解石。

2.2 分析方法

笔者所采集的硫同位素样品测试工作由中国地质科学院矿产资源研究所完成,所用仪器为 MAT-251EM 质谱仪,硫化物样品以 Cu₂O 作氧化剂制样,在高温真空条件下与样品反应,将 S 氧化成 SO₂。采用国际标准 CDT,分析精密度为±0.2‰。

石英铷-锶同位素组成由宜昌地质研究所同位素实验室完成。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比值同位素分析用 MAT-261 可调多接收质谱计直接测定,Rb、Sr 含量采用同位素稀释质谱法测定。在整个分析过程中,用 NBS987 和 GBW04411 标准物质对仪器和分析流程进行监控。

2.3 分析结果

以往文献报道了丁家山铅锌矿矿体内方铅矿与

含矿围岩全岩铅同位素组成,在此将分析结果及相关系数计算结果列于表 1,其中 1~14 号样品数据来源于华东地质勘查局矿产勘查开发院内部资料(华东地质勘查局矿产勘查开发院,1995),15~16 号样品数据来源于丰成友等(2007)的研究。 μ 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 等参数由 Geokit 软件计算获得。方铅矿的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值为 18.182~18.605,极差为 0.423;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值在 15.010~15.932 之间,极差为 0.922;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值在 38.331~39.666 之间,极差为 1.335。含矿围岩的铅同位素组成与方铅矿的非常接近,基本全部落入方铅矿的分析结果范围之内。

本次工作对丁家山铅锌矿床内黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物进行了硫同位素分析,测试数据及前人的分析结果列于表 2。可以看出,53 件样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -1.7‰~5.6‰,平均 2.7‰。其中 22 件闪锌矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -0.9‰~5.6‰,平均值为 3.14‰;10 件黄铁矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -1.7‰~5.4‰,平均值为 1.96‰;6 件磁黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 2.5‰~4.1‰,平均值为 3.26‰;15 件方铅矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0.5‰~4.1‰,平均值为 2.37‰。

将丁家山铅锌矿中 5 件石英样品的铷-锶同位素组成列于表 3。对 5 件样品的⁸⁷Rb/⁸⁶Sr、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值进行最小二乘法直线拟合,得出方程 $y=0.0021x$

表 1 丁家山铅锌矿内方铅矿与含矿围岩铅同位素及相关参数
Table 1 Isotope analyses and related parameters of galena and wall rocks from the Dingjiashan Pb-Zn ore district

样号	样品性质	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
1	方铅矿	18.538	15.835	39.108	9.91	96.28	34.31	59.61
2		18.307	15.631	38.678	9.54	76.32	20.59	44.47
3		18.304	15.613	38.561	9.50	74.57	19.31	40.44
4		18.605	15.932	39.666	10.10	105.58	41.00	77.68
5		18.308	15.627	38.629	9.53	75.93	20.30	42.90
6		18.243	15.563	38.459	9.41	69.63	15.97	36.92
7		18.182	15.517	38.331	9.32	65.07	12.91	32.92
8		18.407	15.340	39.018	8.96	60.61	0.41	41.29
9		18.274	15.594	38.485	9.47	72.68	18.07	38.31
10		18.322	15.629	38.357	9.53	76.15	20.39	35.22
11		18.339	15.639	38.694	9.55	77.14	21.04	44.31
12		18.483	15.752	38.947	9.76	88.25	28.58	52.61
13		18.476	15.010	38.812	8.34	64.59	-21.11	35.8
14		18.380	15.653	38.676	9.57	78.56	21.9	43.27
15	围岩	18.144	15.600	38.575	9.49	73.12	18.97	45.25
16	全岩	18.281	15.620	38.930	9.52	75.21	19.89	51.51

表 2 丁家山铅锌矿硫同位素组成测试结果
Table 2 S isotope analyses of the Dingjiashan Pb-Zn ore district

序号	样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	序号	样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	90pd4-3-1-1	闪锌矿 [±] (深色)	2.5	28	Djs-7	闪锌矿 [±]	3.8
2	90pd4-3-1-2	闪锌矿 [±] (浅色)	3.9	29	Djs-10	方铅矿 [±]	1.1
3	90pd4-3-1-3	方铅矿 [±]	1.9	30	Djs-10	闪锌矿 [±]	3.4
4	90cm3-3j-1	闪锌矿 [±] (浅色)	3.4	31	Fsl-4	方铅矿 [±]	4.1
5	90cm3-3j-2	黄铁矿 [±]	1.8	32	Fsl-19	黄铁矿 [±]	5.3
6	90cm3-3j-3	方铅矿 [±]	1.2	33	Fsl-20	磁黄铁矿 [±]	4.1
7	90cm3-5-1	闪锌矿 [±] (深色)	0.0	34	DZ-1	闪锌矿 [±]	4.3
8	90cm3-5-2	闪锌矿 [±] (浅色)	3.6	35	DZ-2	黄铁矿 [±]	5.4
9	90cm3-5-3	方铅矿 [±]	2.3	36	DZ-18	闪锌矿 [±]	4.7
10	90pd12-9k-1	闪锌矿 [±] (浅色)	5.0	37	DZ-19	闪锌矿 [±]	4.6
11	90pd12-9k-2	磁黄铁矿 [±]	4.1	38	DZ-21	方铅矿 [±]	2.8
12	90pd12-9k-3	黄铁矿 [±]	4.7	39	Fsl-4	闪锌矿 [±]	5.6
13	90c1-8j-1	闪锌矿 [±] (浅色)	3.3	40	Fsl-20	方铅矿 [±]	4.1
14	90c1-8j-2	方铅矿 [±]	1.5	41	DZ-1	方铅矿 [±]	2.7
15	90c1-8j-3	磁黄铁矿 [±]	2.6	42	DZ-2	方铅矿 [±]	2.7
16	70c4-6-1	闪锌矿 [±] (深色)	3.6	43	DZ-18	方铅矿 [±]	1.9
17	70c4-6-2	闪锌矿 [±] (浅色)	2.7	44	DZ-19	方铅矿 [±]	3.1
18	70c4-6-3	磁黄铁矿 [±]	2.8	45	DZ-20	方铅矿 [±]	3.2
19	50c3-7-2-1	闪锌矿 [±] (浅色)	-0.9	46		黄铁矿 [±]	0.0
20	50c3-7-2-2	黄铁矿 [±]	-1.1	47		磁黄铁矿 [±]	2.5
21	30c1-2-1	闪锌矿 [±] (浅色)	-0.7	48		黄铁矿 [±]	0.9
22	30c1-2-2	黄铁矿 [±]	-1.7	49	无原始 样号	闪锌矿 [±]	2.2
23	K2-1	闪锌矿 [±] (浅色)	3.2	50		闪锌矿 [±]	2.5
24	K2-2	方铅矿 [±]	0.5	51		磁黄铁矿 [±]	2.7
25	Djs-6	闪锌矿 [±]	2.7	52		黄铁矿 [±]	2.6
26	Djs-6	黄铁矿 [±]	1.7	53		闪锌矿 [±]	2.7
27	Djs-7	方铅矿 [±]	2.4				

注：序号 1~24 号样品来源于本文，样品号中 90、70、50、30 为中段标高，pd 代表平硐，cm 代表穿脉，c 代表采场，K 代表地表检样；序号 25~53 号样品来自丰成友等，2007 资料。

表 3 丁家山铅锌矿中石英 Rb-Sr 同位素组成测试结果
Table 3 Rb-Sr isotope analyses of the Dingjiashan Pb-Zn ore district

序号	样品号	共生硫化物	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$
1	70tj8	Po + Sp + Gn	0.5047	0.6438	2.264	0.72295 ± 0.00002
2	90ZK1707	Po + Sp	0.3358	0.2508	3.867	0.72656 ± 0.00004
3	50cm7	Po + Sp + Gn + Py	0.1985	0.5091	1.126	0.72057 ± 0.00002
4	50ZK1707	Sp + Py	0.7124	0.5394	3.815	0.72573 ± 0.00003
5	50c3	Py + Sp + Mag	0.4257	0.3602	3.413	0.72554 ± 0.00002

注：样品号一栏中，50、70、90 表示中段标高，tj 表示天井，ZK 表示钻孔，cm 代表穿脉，c 代表采场。

+0.718，相关系数 $r = 0.994$ ，相关性良好(图 2)。石英与铅锌硫化物共生，是成矿期的产物，根据该方
程求得的年龄， $t = (146.15 \pm 3.95) \text{ Ma}$ ，也应为成矿
年龄。

3 讨 论

3.1 成矿物质来源

丁家山铅锌矿中方铅矿的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/

²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值的极差分别为 0.423、0.922
和 1.335。如此大的极差说明矿区的铅并非均一来
源。方铅矿 μ 值为 8.34~10.10，平均值为 9.46，围
岩全岩铅同位素 μ 值与方铅矿 μ 平均值非常接近。
以往研究中得出的全球地幔 μ 值为 10.01，下地壳为
6.94，上地壳为 11.08(李龙等，2005)。由此可见丁
家山铅锌矿铅同位素 μ 值平均值接近全球范围地幔
 μ 值。

在铅同位素组成图(图3)上，13号样品超出图幅

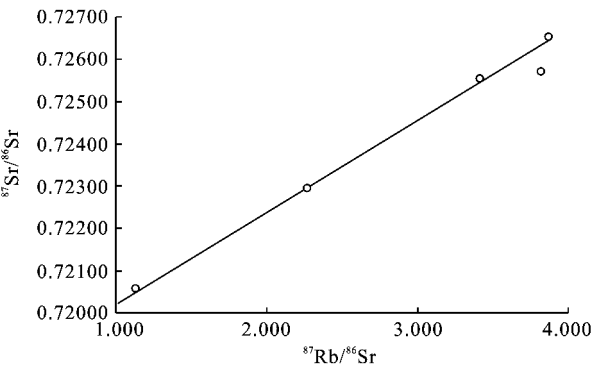


图 2 丁家山铅锌矿 Rb-Sr 同位素等时线图
Fig. 2 Rb-Sr isotope contour map of the Dingjiashan
Pb-Zn ore district

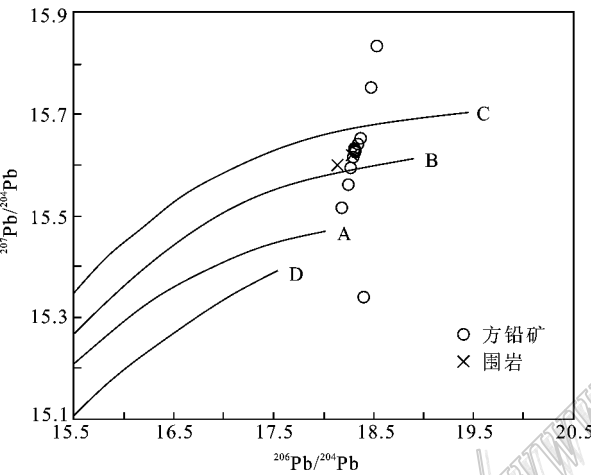


图 3 丁家山矿区铅同位素组成
A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳
Fig. 3 Lead isotope composition of the Dingjiashan
Pb-Zn ore district
A—Mantle; B—Orogenic belt; C—Upper crust; D—Lower crust

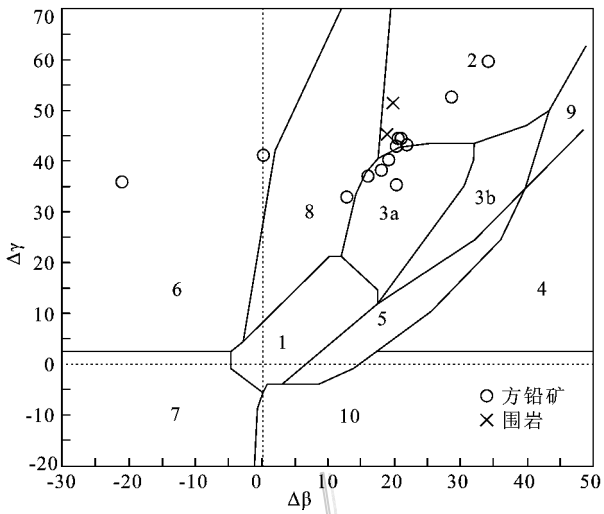


图 4 丁家山矿区铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图
1—地幔源铅; 2—上地壳源铅; 3—上壳与地幔混合的俯冲带铅
(3a—岩浆作用; 3b—沉积作用); 4—化学沉积型铅; 5—海底热
水作用铅; 6—中深变质铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山
带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅
Fig. 4 Pb isotope $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ genetic classification of the
Dingjiashan Pb-Zn ore district
1—Mantle lead; 2—Upper Crust lead; 3—Subduction zone lead
mixed with upper crust and mantle (3a—Magmatism, 3b—Deposi-
tion); 4—Chemical deposition lead; 5—Submarine hot water lead;
6—Mesometamorphism lead; 7—Katametamorphism lower crust
lead; 8—Orogenic belt lead; 9—Ancient shale upper crust lead; 10—
Retrometamorphism lead

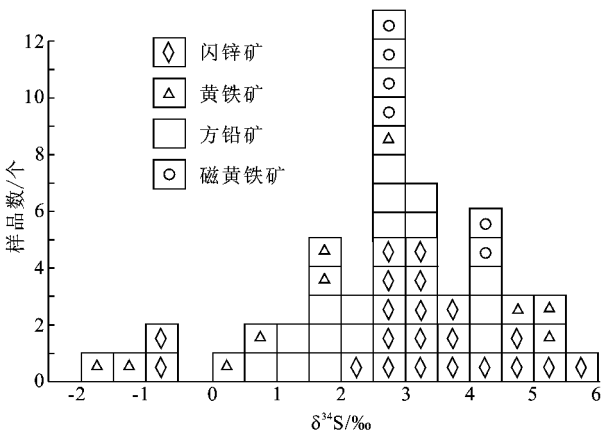


图 5 丁家山铅锌矿区 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素直方图
Fig. 5 $\delta^{34}\text{S}$ isotope histogram of the Dingjiashan
Pb-Zn ore district

范围,此外,除 8 号方铅矿样品稍有偏移外,其他 14 件样品呈明显的线性排列贯穿了地幔、造山带和上地壳区域,在 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解(图 4)(朱炳泉, 1998)上,4 号样品超出图幅范围,此外,除 2 件样品落入中深变质铅区域(6 区)以外,其他 13 件样品均集中落在上地壳源铅区域(2 区)和与岩浆作用有关的上壳与地幔混合的俯冲带铅区域(3a 区)及附近。两类图解共同显示丁家山铅锌矿内铅具有明显的壳幔混合特征,并与岩浆活动关系密切。

丁家山铅锌矿床 53 件硫同位素样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围很小,向正值偏移,具有明显的塔式分布特征,峰值为 3‰(图 5)。矿区含硫矿物为磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿及少量黄铜矿等硫化物,不

含硫酸盐矿物,矿物组合相对简单,说明其成矿流体较为单一,未经历复杂的演化过程和较强的分馏作用(赵军等, 2012)。必须注意的是,矿区矿石样品中有深色、浅色两类闪锌矿,其中深色闪锌矿中一般都

含有磁黄铁矿或黄铜矿包裹体,很多包裹体呈明显的叶片状形态,反映明显的固溶体分离特征(张术根等 2011),而且这类闪锌矿与方铅矿之间存在明显的交代关系,说明深色闪锌矿和方铅矿还未达到平衡。而浅色闪锌矿相对较纯净,并不含任何包裹体,浅色闪锌矿与方铅矿之间的接触边界平直光滑,无任何发生交代作用的迹象。由此说明浅色闪锌矿和方铅矿之间已达到平衡。对同一样品中浅色闪锌矿、方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值和 $1000 \ln \alpha$ 值进行最小二乘法线性拟合后,得出两类矿物的拟合方程分别为:

$$y = -0.2453x + 3.971, r = -0.455 \quad (1)$$

$$y = -1.2453x + 3.971, r = -0.933 \quad (2)$$

对两个方程求公共解,得出 $x = 0, y = 3.97$,即浅色闪锌矿和方铅矿成矿系统源区 $\delta^{34}\text{S}$ 组成为 3.97‰ 。该值与图 4 中矿区硫化物塔式分布的集中值($3\text{‰} \pm$)接近,基本能代表整个成矿系统硫的源区初始值,且非常接近原始地幔硫($0 \pm 3\text{‰}$, Chaussidon et al., 1990)。以往研究证实矿区西北部呈北东向分布的燕山期重融型串珠状花岗岩岩株与成矿关系紧密(石得凤 2012),而重熔型花岗岩由下地壳或上地幔的某些部位因温度升高部分熔融而形成(武汉地质学院, 1985)。由此可知,矿区燕山期重融型花岗岩为成矿的硫源。

3.2 成矿时代

通过对成矿期石英 Rb-Sr 同位素测试获得的丁家山铅锌矿成矿年龄为 $(146.15 \pm 3.95) \text{ Ma}$,表明丁家山铅锌矿成矿时代为晚侏罗世,属燕山早期。闽中地区甚至整个东南沿海地区在燕山早期发生过一次重要的多金属矿化作用(高延光, 2007)。这一阶段是东南大陆构造域转换的开端(吴淦国等, 2000),构造活动强烈,岩浆活动频发,为闽中地区众多矿床的形成提供了条件。

3.3 矿床成因

如前所述,目前关于丁家山铅锌矿床的成因主要有接触交代型和块状硫化物型 2 种看法。从成矿物质来源的角度分析,丁家山铅锌矿床的硫同位素组成范围较窄,成矿系统硫的源区初始值接近原始地幔硫,矿区西北部呈北东向分布的串珠状重熔型花岗岩岩株为成矿的硫源。以往研究证实,火山成因块状硫化物矿床(VMS 型)硫同位素组成接近于同时期的海水硫同位素组成(刘晓东等, 1999; 王玉奇, 2009),而喷流-沉积型块状硫化物矿床(SEDEX 型)的硫同位素组成变化范围较大,并有同时期海水

来源硫及生物来源硫参与成矿(徐克勤等, 1996)。丁家山铅锌矿基本没有生物硫的参与, $\delta^{34}\text{S}$ 均值远小于侏罗纪晚期海水中硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 均值(略大于 15‰) (魏菊英等, 1988),与以上两类块状硫化物矿床的特征并不符合。铅同位素组成图(图 3)和 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图(图 4)显示丁家山铅锌矿内的铅有壳-幔混合特征,说明铅、锌可能由地层和燕山期重熔型花岗岩共同提供。1:10 000 化探次生晕扫描面结果显示,矿区地层内铅的丰度值分别为克拉克值和区域背景值的 100 倍和 47 倍(华东地质勘探局 807 队, 1993)。成矿流体在运移过程中与围岩发生了反应,萃取了围岩中丰富的成矿物质。因此,可以确定丁家山铅锌矿床是岩浆岩与围岩共同作用的结果。

石英 Rb-Sr 同位素获得的丁家山铅锌矿成矿年龄为 $(146.15 \pm 3.95) \text{ Ma}$,属晚侏罗世,为燕山运动早期第三阶段(福建省地质矿产局, 1985)。该时期与华南地区燕山期重熔型花岗质岩浆侵入活动时间完全吻合。石英样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.7182,与重熔型花岗岩相关的矽卡岩矿床该值大于 0.710 的特征完全符合(赵一鸣等, 1990)。另外,利用闪锌矿+六方磁黄铁矿+黄铁矿地质压力计,计算结果显示丁家山铅锌矿床的成矿压力与区内西北部燕山期重熔型花岗岩成岩压力基本一致(张术根等, 2011),进一步证实了重融型花岗岩与铅锌矿体成矿的密切联系。

综合性原岩恢复研究结果显示,作为矿区主要赋矿围岩的石榴子石-透辉石-绿帘石系列变质岩的原岩,为经过加里东期区域变质的钙质泥岩、钙质泥质粉砂岩、钙质粉砂质泥岩、泥灰岩等富钙质的沉积岩类(张术根等, 2012)。因此,研究区完全具备发生接触交代作用的条件。微区成分分析及计算结果证实,矿区赋矿围岩内的石榴子石为与接触交代变质作用关系紧密的钙铁榴石和钙铝榴石,并非与块状硫化物矿床相关的铁铝榴石(石得凤, 2012)。

以上各方面研究结果均显示,丁家山铅锌矿床为燕山期重熔型花岗岩与经加里东期区域变质作用的富钙质沉积岩发生接触交代作用而形成的矽卡岩型矿床。

4 结 论

(1) 丁家山铅锌矿床的成矿物质具有多来源特征,其中铅、锌可能由龙北溪组地层和燕山期重熔型

花岗岩共同提供, 硫由燕山期重熔型花岗岩提供;

(2) 根据 Rb-Sr 等时线年龄, 确定丁家山铅锌矿床的成矿时间为 (146.15 ± 3.95) Ma, 为侏罗纪晚期, 属燕山早期第三阶段;

(3) 铅、硫、铷、锶同位素研究均揭示矿区成矿与燕山期中酸性岩浆侵入活动关系密切, 证实丁家山铅锌矿是马面山群龙北溪组上段经区域变质的钙质泥岩、钙质泥质粉砂岩、钙质粉砂质泥岩、泥灰岩等富钙质岩石与燕山期花岗岩发生接触交代作用形成的产物, 属矽卡岩型矿床。

参考文献/References

- 狄永军, 吴淦国, 张 达, 余心起, 林东燕, 石建基, 藏文拴, 张祥信, 汪群峰. 2006. 闽中地区铅锌矿床辉石成分特征及其成因意义[J]. 矿床地质, 25(2):123-134.
- 丰成友, 丰耀东, 张德全, 余宏全, 李大新, 李进文, 董英君. 2007. 闽中梅仙式铅锌银矿床成矿物质来源的硫、铅同位素示踪及成矿时代[J]. 地质学报, 81(7):906-916.
- 福建省地质矿产局. 1985. 福建区域地质志[M]. 北京:地质出版社. 309-340.
- 高延光. 2007. 闽中地区铅锌铜多金属矿成矿规律及资源潜力评价(博士论文[D]. 导师:吴淦国. 北京:中国地质大学. 55页.
- 华东地质勘探局 807 队. 1993. 福建省尤溪县梅仙铅锌矿普查地质报告[R]. 内部资料.
- 华东地质勘查局矿产勘查开发院. 1995. 福建中部前寒武纪地层中梅仙式铅(银)矿床找矿预测研究报告[R]. 内部资料.
- 华东有色地质矿产勘查开发院. 2002. 福建省尤溪县梅仙矿区丁家山铅锌矿床 15~23 线矿段详查地质报告[R]. 内部资料.
- 李 龙, 郑永飞, 周建波. 2005. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型[J]. 岩石学报, 17(1):61-68.
- 刘晓东, 周涛发. 1999. 块状硫化物矿床地质地球化学特征与形成机理[J]. 合肥工业大学学报, 22(4):42-47.
- 闽西地质队. 1977. 丁家山、峰岩、关兜等矿点评价报告[R]. 内部资料.
- 石得凤. 2012. 福建尤溪丁家山铅锌矿床成因、成矿机理及成矿规律研究(博士论文[D]. 导师:张术根. 长沙:中南大学. 111-115.
- 石得凤, 张术根, 韩世礼. 2012a. 矿物学填图在福建丁家山铅锌矿成因研究中的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 31(2):243-251.
- 石得凤, 张术根, 韩世礼, 艾国梁. 2012b. 福建梅仙丁家山铅锌矿成矿系统分析[J]. 中国有色金属学报, 22(3):809-818.
- 王玉奇. 2009. Sedex 型矿床与 VMS 型矿床对比研究[J]. 资源环境与工程, 23(3):259-262.
- 魏菊英, 王关玉. 1988. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社. 154 页.
- 吴淦国, 张 达, 陈柏林. 2000. 中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例[J]. 地球科学, 25(4):390-396.
- 武汉地质学院. 1985. 岩浆岩岩石学[M]. 北京:地质出版社. 147 页.
- 徐克勤, 王鹤年, 周建平, 朱金初. 1996. 论华南喷流-沉积块状硫化物矿床[J]. 高校地质学报, 2(3):241-256.
- 叶水泉, 倪大平, 吴志强. 1999. 福建省梅仙式块状硫化物矿床[J]. 火山地质与矿产, 20(2):172-180.
- 张术根, 石得凤, 韩世礼, 李桂秀. 2011. 福建丁家山铅锌矿区磁黄铁矿成因矿物学特征研究[J]. 矿物岩石, 31(3):11-17.
- 张术根, 石得凤, 韩世礼. 2012. 福建尤溪梅仙地区马面山群变质岩原岩恢复及与铅锌成矿关系研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 43(8):3104-3113.
- 赵 军, 张作衡, 刘晓阳, 刘 敏, 张 贺, 朱维娜. 2012. 新疆阿吾拉勒成矿带西段铜矿床碳、氧、硫、铅同位素研究——成矿物质来源及成矿环境探讨[J]. 矿床地质, 31(5):999-1013.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 李大新, 蒋崇俊. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质出版社. 135 页.
- 周 兵, 顾连兴. 1999. 论梅仙块状硫化物矿床的特征及成矿地质环境[J]. 矿床地质, 18(2):99-109.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用-兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京:科学出版社. 224-226.
- Chaussidon M and Lorand J P. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariège (North-eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54:2835-2846.