

豫西南赤土店铅锌矿床地质、流体包裹体和 S、Pb 同位素地球化学特征

段士刚¹ 薛春纪¹ 冯启伟¹ 高炳宇¹ 刘国印² 燕长海² 宋要武²

(1.地质过程与矿产资源国家重点实验室,中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083;

2.河南省地质调查院,河南 郑州 450007)

摘要:豫西南栾川地区近年铅锌矿勘查取得显著进展,显示出良好的资源前景。赤土店铅锌矿床是新发现的铅锌矿之一,从控矿要素和矿体产状看,有两种矿化类型,即北西西向断裂构造控制的脉状铅锌矿,和石宝沟岩体外围矽卡岩带中的铅锌矿,并以前者为主。在空间上围绕斑岩体往外,构成近斑岩体发育矽卡岩型钼矿化,远斑岩体接触带的围岩矽卡岩中发育矽卡岩型多金属矿床,在斑岩体外围的断裂带中发育脉型铅锌银矿床的空间分布或分带规律。流体包裹体研究显示,成矿阶段温度较高(290~340℃),流体含大量 CO₂,并发生过流体不混溶分离。S 同位素组成(0.20‰~8.30‰,平均 3.93‰)显示,硫有深部岩浆(区内斑岩硫集中在 2‰~4‰)和地层(分别集中在-13‰~-8‰和 6‰~11‰两个区间)两种来源。被矿相学研究证实共生的方铅矿-闪锌矿矿物对计算出平衡温度为 388.29℃,亦显示高温特征。Pb 同位素组成(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 17.005~17.953, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.414~15.587, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 37.948~39.03)反映,脉状铅锌矿成矿物质可能主要来自斑岩,部分来自地层。综合分析认为,赤土店矿床为与燕山期斑岩有关的铅锌矿,其脉状矿体为岩浆热液充填-交代成因类型。

关键词:流体包裹体; S、Pb 同位素; 铅锌矿床; 岩浆热液充填-交代矿床; 赤土店; 河南栾川

中图分类号: P618.42; P618.43; P618.52

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2011)02-0427-15

豫西南栾川地区近年铅锌矿勘查取得显著进展,先后发现百炉沟、赤土店、冷水北沟、杨树凹、银河沟等十余处铅锌银多金属矿脉群,上百条含矿断裂带,铅、锌和银的资源量都达到了大型规模^[1-5]。关于这些铅锌矿的理论研究能够提高该区区域成矿学认识,进而影响到找矿工作部署思路。由于该地区铅锌矿勘查起步晚,研究程度低,对铅锌矿成因目前存在不同认识,如块状硫化物矿床和 MVT 矿床^[1]、矽卡岩型和热液脉型矿床^[2-4,6]、Sedex 型矿床^[7]、造山型铅锌矿^[8]等。笔者以赤土店铅锌矿床为对象,观察其地质特征,测试矿物流体包裹体温度和 S、Pb 同位素组成,旨在探讨矿床成因。

1 区域地质背景

豫西南栾川地区位于华北陆块南缘华熊克拉通边缘拗陷卢氏—栾川褶皱断裂带内^[9](图 1)。区内出露地层主要有中元古界官道口群白术沟组、上元古界栾川群和震旦系陶湾群(图 1)。白术沟组主要出露上段层位,岩性为炭质板岩夹含炭石英细砂岩,局部夹含炭大理岩。栾川群自下而上分为三川组、南泥湖组、煤窑沟组、大红口组和鱼库组,各组岩石均呈北西西—北西向条带状展布(图 2)。三川组下部以含石英细粒变质砂岩为主,上部以大理岩为主;南泥湖组下段为钙质砂岩、变石英砂岩,中段为绢云钙质片

收稿日期: 2010-06-08; **改回日期:** 2010-09-17

基金项目:地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金(GPRM200832)、中央高校基本科研业务费专项资金(2009PY04)、高等学校学科创新引智计划(B07011)、长江学者和创新团队发展计划(IRT0755)和国家自然科学基金(40772061、40472054)联合资助。

作者简介:段士刚,男,1983 年生,博士生,矿产普查与勘探专业;E-mail: dsg1102231@163.com。

通讯作者:薛春纪,男,1962 年生,教授,博士生导师,矿床学、矿产普查与勘探专业;E-mail: chunji.xue@cugb.edu.cn。

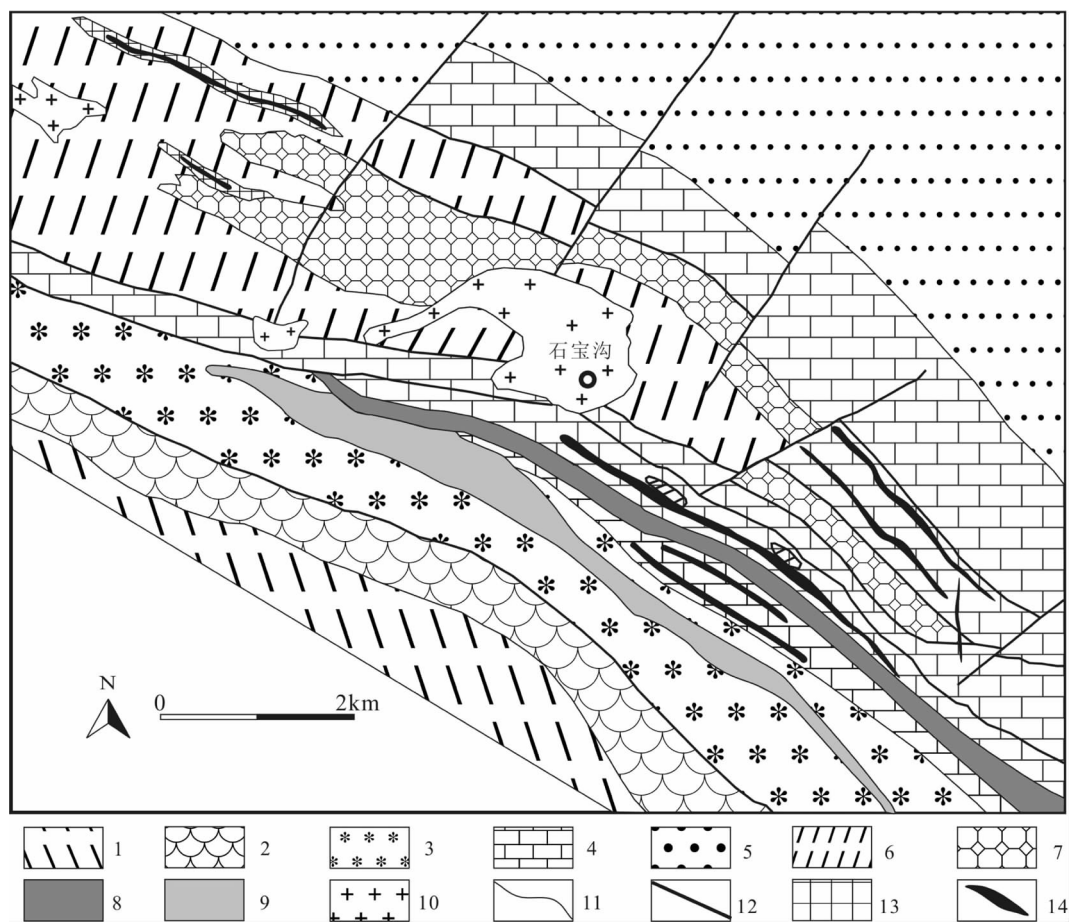


图 2 赤土店铅锌矿地质简图(修改自文献[7])

1—三岔口组;2—鱼库组;3—大红口组;4—煤窑沟组;5—南泥湖组;6—三川组;7—白术沟组;
8—辉长岩墙;9—正长岩墙;10—斑岩;11—断层;12—地质界线;13—矽卡岩;14—铅锌矿体

Fig.2 Geological map of the Chitudian Zn-Pb deposit (modified after Reference [7])
1-Sanchakou Formation;2-Yuku Formaiton; 3-Dahongkou Formation;4-Meiyagou Formation;
5-Nannihu Formation;6-Sanchuan Formation;7-Baishugou Formation;8- Porphry intrusion;
9-Syenite dyke;10-Gabbro dyke;11-Fault;12-Geological boundary;13-Skarn;14-Zinc-lead ore body

2 矿床地质

从控矿要素和矿体产状特点看，赤土店矿床铅锌矿化可分为两种类型:1) 北西西向断裂构造控制的脉状铅锌矿;2) 石宝沟岩体外围矽卡岩带中的铅锌矿化。

2.1 脉状铅锌矿体

赤土店矿床赋矿地层为官道口群白术沟组和栾川群三川组、煤窑沟组。矿体主要受控于北西西走向的断层带，少量受控于南北向断层(图 2)，沿走向呈脉状(图 3)、透镜状、舒缓波状、似层状。一般长 500~1500 m，宽 1~5 m，倾向北北东，倾角 0~70°。Pb+Zn 品位 12.12%~18.29%，Ag 品位 $47.83\times 10^{-6}\sim 407.94\times$

10^{-6} ，Zn/(Pb+Zn)比值变化于 0.444~0.82^[16]。

矿体与围岩界线明显。局部地段矿化分带明显，产状平缓处具有下部为“黄铁矿+石英”组合，上部为“闪锌矿+方铅矿+石英+方解石”组合的特征(图 4-A)。围岩蚀变类型主要包括硅化、白云石化、方解石化等。

矿石构造主要有块状构造、条带状构造(图 4-B)、斑杂状构造(图 4-C)、浸染状构造等。矿石结构主要有中细粒结构、共结结构和交代结构(闪锌矿与方铅矿共结，并均交代黄铁矿，图 4-D、图 4-E)、碎裂结构(闪锌矿呈碎裂状)、固溶体分离结构(黄铜矿在闪锌矿中呈串珠状或片状、乳滴状固溶体，图 4-E)等。矿石矿物组成简单，金属矿物主要为黄铁矿、

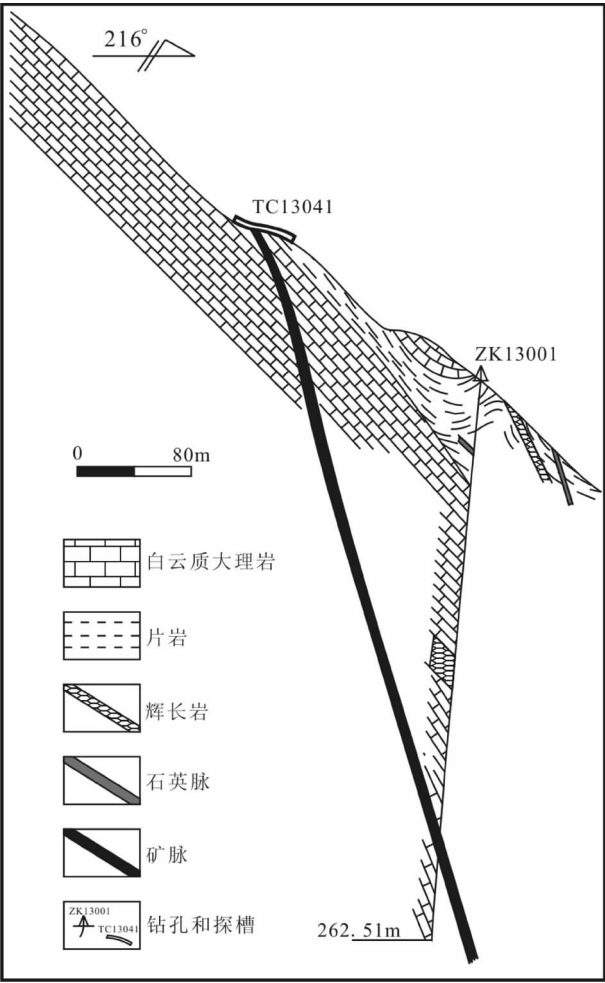


图 3 S130 矿体 0 号勘探线剖面

Fig.3 Geological section along No. 0 exploration line of S130 ore body

方铅矿、闪锌矿、白铁矿,以及少量的黄铜矿、硫锑铜银矿等。脉石矿物主要为石英、方解石、白云石及少量绢云母。

根据矿体地质特征、矿物共生组合和矿石组构特点,将矿化粗略分为早期“石英-黄铁矿”阶段和晚期“闪锌矿-方铅矿-石英-方解石”阶段。另外可能存在更晚期的“石英-方解石-黄铁矿”阶段,以“石英+方解石”组合和流体包裹体均一温度低为特征。

2.2 矽卡岩中铅锌矿化

石宝沟岩体为一燕山期复式岩体,主要由二长花岗岩、钾长花岗岩及花岗斑岩组成^[1]。岩体侵入到白术沟组、三川组和煤窑沟组中,在岩体与地层接触带发育矽卡岩化(图 4-F)、角岩化和漂白大理岩化。漂白的重结晶大理岩中见黑色闪锌矿脉(图 4-G)。

在近岩体接触带的矽卡岩中有辉钼矿化和闪锌矿化(图 4-H),远离岩体的似层状、透镜状矽卡岩中有铅锌矿体(图 2)。空间上围绕斑岩体往外,构成近斑岩体发育矽卡岩型钼矿化,远离斑岩体接触带的围岩矽卡岩中发育矽卡岩型多金属矿床,在斑岩体外围的断裂带中发育脉型铅锌银矿床的空间分布或分带规律。

矽卡岩型铅锌矿石矿物组成复杂。金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、辉钼矿及少量白钨矿、方铅矿等。脉石矿物有透辉石、石榴子石、透闪石、绿帘石、石英、方解石、绢云母等。透辉石、石榴子石为矽卡岩的主要矿物组成。矿石的结构主要有他形粒状结构、共生结构、交代结构等。矿石构造主要为块状、浸染状、条带状、斑杂状等。

3 流体包裹体

3.1 样品和观测方法

用于流体包裹体研究的样品直接采自坑道内脉状矿体,样品新鲜。其中样品 08-A 采自矿体垂向分带的“石英+黄铁矿”组合部分,样品 07-24、07-25、07-26、07-27、07-29、7-30、07-31、DWG-2、DWG-4 采自无分带铅锌矿体或分带矿体的“石英+方解石+闪锌矿+方铅矿”组合部分,样品 YT-2、YT-3 采自有微弱矿化的“石英-方解石-黄铁矿”脉。以上样品可以分别代表上文划分的 3 个成矿阶段。样品制作成双面抛光、厚度 0.3 mm 的包裹体片供冷热台观测和激光拉曼光谱分析。

流体包裹体测温 and 激光拉曼光谱分析在中国地质大学(北京)流体包裹体实验室进行。所用冷/热台为 THMSG600 型和 MDS600 型(英国 Linkman 公司出品),测温范围为-196℃~+600℃,精度及稳定性均在±0.1℃之内。激光拉曼光谱仪器为 Renishaw inVia 型激光拉曼光谱仪(英国生产),514.5 nm Ar⁺激光器,光谱扫描范围 100~4000 cm⁻¹,光谱分辨率小于 2 cm⁻¹,重复性+0.2 cm⁻¹。

3.2 流体包裹体岩相学

样品中流体包裹体丰富(图 5),大小多在 2~12 μm,原生和次生皆有发育,原生流体包裹体形状多样,但以正方形、近椭圆形为主,分布不均匀,常孤立产出或成群密集出现;次生流体包裹体常沿次生裂隙定向分布,一般小于 2 μm。样品中石英、方解石的原生流体包裹体可以分为 4 种类型:

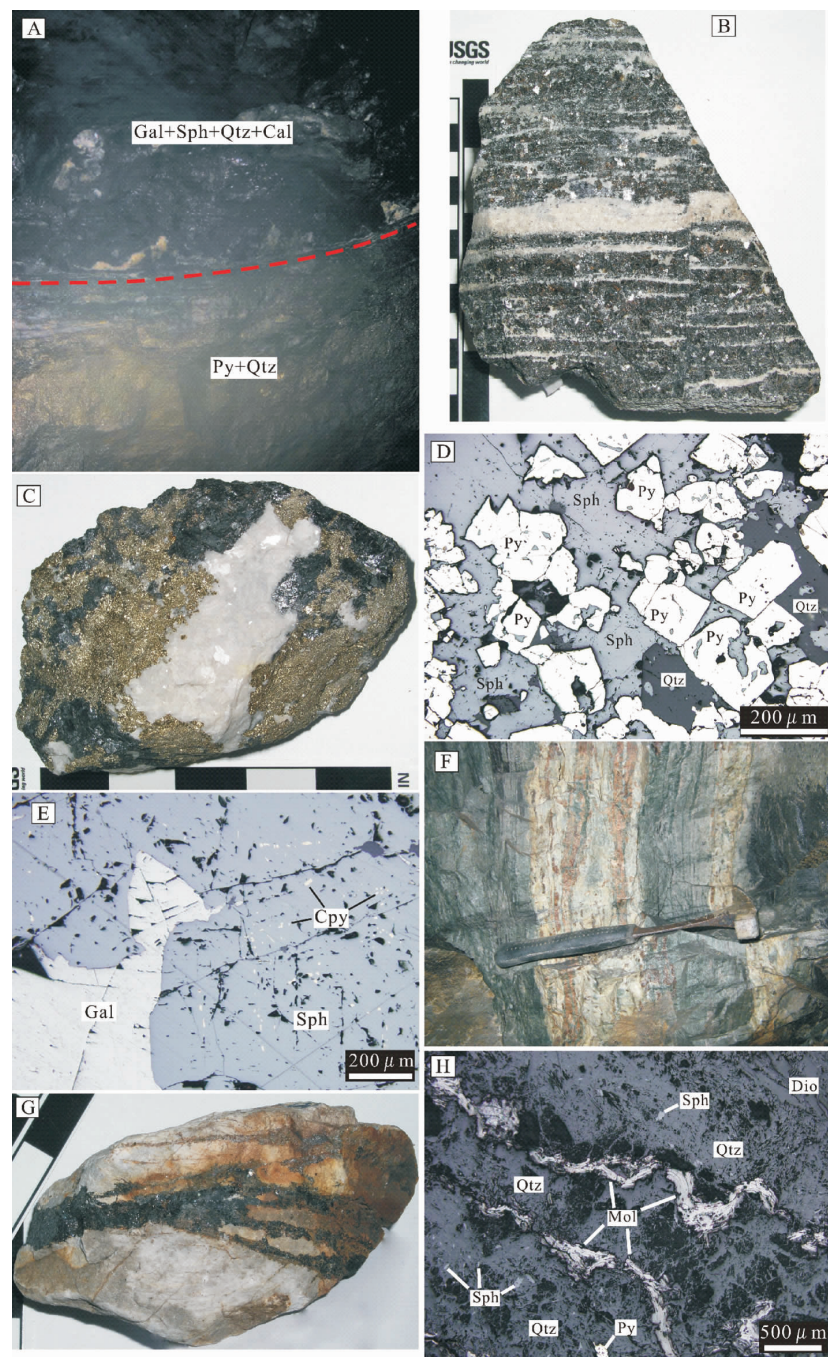


图 4 矿体、矿石、矿相显微照片

A—S130 矿体垂向分带,底部为石英+黄铁矿共生组合,上部为方铅矿+闪锌矿+石英+方解石组合,垂向高约 2 m;B—条带状矿石,深棕色条带由闪锌矿组成,白色条带为石英、方解石和少量菱铁矿;C—斑杂状矿石,黑色矿物为闪锌矿和少量方铅矿,黄色矿物为黄铁矿,白色矿物为方解石和石英;D—闪锌矿交代黄铁矿(单偏光,样品 07-33, S130);E—闪锌矿与方铅矿共生,闪锌矿中见黄铜矿出溶体(单偏光,样品 07-10, S01);F—CM0264 矿洞内,近石宝沟岩体处发育条带状矽卡岩,主要由红棕色石榴子石、灰绿色透辉石和石英组成;G—漂白的重结晶大理岩中黑色闪锌矿脉;H—条带状矽卡岩中有辉钼矿和闪锌矿化;Cpy—黄铜矿;Dio—透辉石;Gal—方铅矿;Mol—辉钼矿;Qtz—石英;Py—黄铁矿;Sph—闪锌矿

Fig. 4 Photographs from the Chitudian ore deposit

A—Vertical zonation of S130 ore body, the lower part is a quartz-pyrite association, the upper part is a galena-sphalerite-quartz-calcite association. Vertical height is about 2 m; B—Banded ore, dark brown bands are mainly sphalerite, white bands are mainly quartz, calcite, with minor amounts of siderite; C—Taxitic ore, black minerals are spalerite and a little galena, yellow mineral is pyrite, white minerals are calcite and quartz; D—Sphalerite replacing pyrite (Sample 07-33, S130); E—Sphalerite associated with galena, and there is chalcopyrite exsolution lamellae in sphalerite (Sample 07-10, S01); F—Banded skarn discovered in adit CM0264 near Shibaogou intrusion, consisting of red brown garnet, gray green diopside, and quartz; G—Black sphenolite vein in bleached white recrystallized marble. H—Molybdenite and sphalerite mineralization of the banded skarn; Cpy— Chalcopyrite; Dio—Diopside; Gal—Galena; Mol—Molybdenite; Qtz—Quartz; Py—Pyrite; Sph—Sphalerite

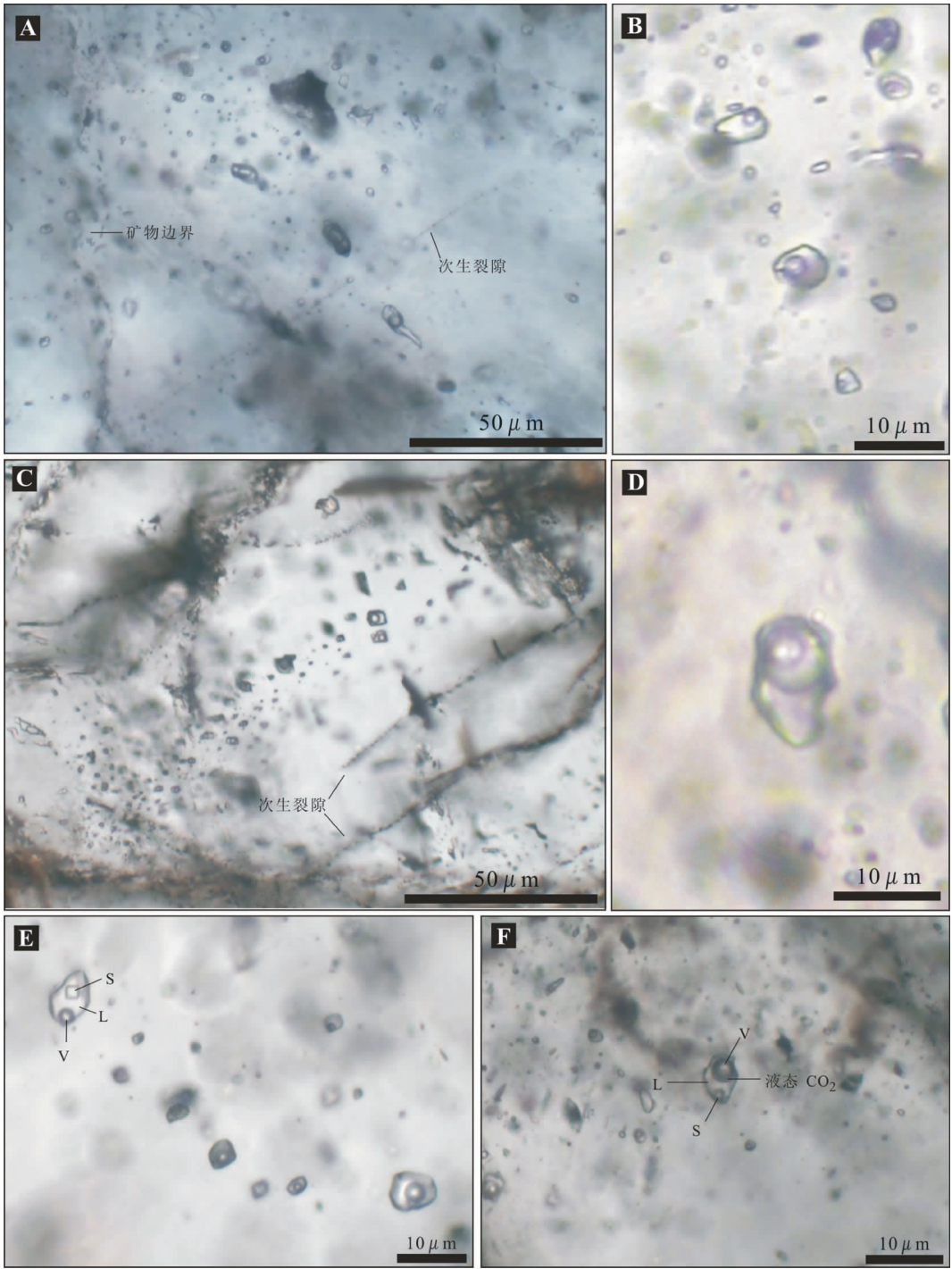


图 5 脉石英和方解石中典型流体包裹体显微照片

A—石英中气液两相包裹体、CO₂包裹体和次生裂隙、次生包裹体(07-30);B—石英中近圆形气液两相包裹体(07-27);C—方解石中原生带状立方体包裹体和次生裂隙、次生包裹体(DWG-4);D—石英中 CO₂包裹体(07-31);E—石英中气液两相包裹体和含石盐子晶包裹体共生(07-30);F—石英中气液两相包裹体、CO₂包裹体和含子晶 CO₂包裹体共生

Fig.5 Microphotographs of typical fluid inclusions in quartz and calcite

A—Distribution characteristics of fluid inclusion type I and II in quartz, and development of secondary fractures and secondary fluid inclusions (07-30);B—Slightly rounded fluid inclusions of type I in quartz (07-27);C—A belt of primary cubic shaped fluid inclusions of type II in calcite and development of secondary fractures and secondary fluid inclusions (DWG-4);D—Fluid inclusions of type II in quartz (07-31);E—Paragenetic fluid inclusions of type I and III in quartz (07-30);F—Paragenetic fluid inclusions of type I, II and IV in quartz (07-30)

I 类:富液体两相包裹体(图 5-A、B、E 和 F),由气相和液相组成,气体充填度在 5%~30%,一般 15%,在各样品中均有发育。加热后均一为液相。

II 类:CO₂ 包裹体(图 5-A、C、D 和 F),室温下由气态 CO₂、液态 CO₂ 和水组成。CO₂ 相/水为 30%~50%,但可以变化较大,如在包裹体片 07-30(图 5-A)中,CO₂ 相/水变化于 25%~95%。

III 类:含石盐子晶三相包裹体(图 5-E),由气相、液相和石盐子晶组成,孤立状或成群出现。加热时子矿物先融化,然后气泡消失。子矿物立方体型,可能为石盐子晶。

IV 类:含子矿物四相 CO₂ 包裹体(图 5-F),十分少见,仅在包裹体片 07-30 中见到一个,该包裹体 CO₂ 部分约占 40%,并以气态 CO₂ 为主。

3.3 流体包裹体显微冷、热台观测

流体包裹体测温主要针对脉石石英和方解石。包裹体测温结果总结于表 1,均一温度、盐度分布见图 6~7。

石英+黄铁矿阶段样品主要发育气液两相包裹体和含子矿物三相包裹体,完全均一至液相。气液两相包裹体完全均一温度变化范围较大,为 257.3℃~414.9℃;冰点温度变化于-10.6℃~-9.4℃,对应盐度为(14.6~13.3)wt% NaCl equiv(表 1 图 7-A、B)。测得一个含子矿物包裹体完全均一温度 362.2℃,子矿物溶解温度 306.2℃,对应盐度 38.64wt% NaCl equiv。

闪锌矿+方铅矿+石英+方解石阶段样品 4 类包裹体均有发育,但以气液两相包裹体和 CO₂ 包裹体为主。完全均一温度变化范围较宽,但主要变化于 290~340℃(图 7-C)。该主要变化范围与石英+黄铁矿阶段温度范围相似。气液两相包裹体均一温度 191~405.5℃,冰点变化于-10.8~-2.2℃,对应盐度(3.7~14.8)wt% NaCl equiv。测得两个低温冰点-18.9℃和-19.6℃(07-30 片内),分别对应盐度 21.6 wt% NaCl equiv 和 22.1 wt% NaCl equiv。CO₂ 包裹体固相 CO₂ 融化温度为-59.9~-55.9℃(表 1),大部分低于纯固相 CO₂ 熔点(-56.6℃),可能指示了混有 CH₄ 或其他气体^[17-18];笼合物融化温度 3.2~8.9℃,对应盐度(2.2~11.7)wt% NaCl equiv;部分均一温度 20.4~31.5℃,完全均一温度 204~357.2℃。

测得两个含子矿物三相包裹体,其中一个均一温度 350.3℃(至液相),子矿物石盐溶解温度

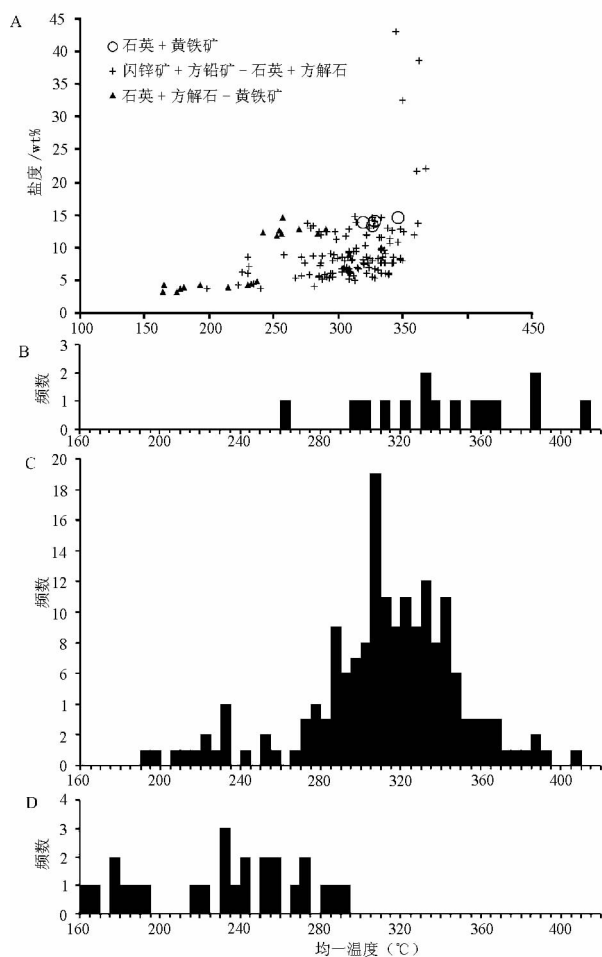


图 6 A—流体包裹体测温均一温度-盐度图;B—石英+黄铁矿组合样品流体包裹体均一温度直方图;C—闪锌矿+方铅矿+石英+方解石组合样品流体包裹体均一温度直方图;D—石英+方解石+黄铁矿组合样品流体包裹体均一温度直方图

Fig.6 A—Homogenization temperatures versus salinities of fluid inclusions of quartz-pyrite composite sample, ore samples, and quartz-calcite-pyrite composite samples; B—Homogenization temperatures of fluid inclusions in quartz-pyrite composite sample; C. Homogenization temperatures of fluid inclusions in ore samples; D—Homogenization temperatures of fluid inclusions in quartz-calcite-pyrite composite samples

211.8℃,盐度 32.5wt% NaCl equiv。另一个包裹体石盐溶解温度 357.2℃,盐度 43.1wt% NaCl equiv,在温度 344.7℃时均一至液相。石盐溶解温度高于液相均一温度,357.2℃为包裹体真正均一温度。含子矿物包裹体指示成矿热液盐度可能有过局部的、短暂的升高。在同一包裹体片中测得一个含子矿物四相 CO₂ 包裹体,固相 CO₂ 融化温度-58.3℃,部分均一温度 29.9℃,石盐溶解温度 336.7℃,完全均一温度 360.4℃。同一包裹体片(07-30)内出现以上 4 种包

表 1 脉石石英和方解石中流体包裹体显微测温结果
Table 1 Summary of fluid inclusion microthermometric data in quartz and calcite

样品	类型	Tm/℃	Tcla/℃	Te/℃	Tice/℃	Td/℃	Th/℃	盐度/wt% NaCl equiv
08-A	I				-10.6~-9.4		257.3~414.9	13.3~14.6
	III					306.2	362.2	38.64
07-24	I				-10.8~-8.6		276~362	12.4~14.8
	II	-57.6	6.3~7.3	30.2~30.9			307~308	5.2~7.0
07-25	I				-6.6~-4.4		294~348	7.0~10.0
	II	-57.7~-57.4	7.0~7.2	31			267~326	5.4~5.8
07-26	I				-9.2~-4.9		230~351	7.7~13.1
	II	-56.9~-56.8	8.6~8.9	27.8~29.2			308.2~334	2.2~2.8
07-27	I				-5.8~-4.6		258~325	7.3~8.9
	II	-59.1~-56.9	5.9~8.3	23.1~31.4			240~339	3.4~7.6
07-29	I				-5.2~-3.1		287~367	5.1~8.1
07-30	I				-18.9~-19.6		307.9~405.5	21.6~22.1
	II	-59.9~-58.1	3.8~5.9	20.4~30.6			307.9~357.2	7.6~10.9
	III					211.8~357.2	344.7~350.3	32.5~43.0
	IV	-58.3	-11.9(?)	29.9		336.7	360.4	
07-31	I				-8.9~-7.8		212~359	11.5~12.7
	II	-59.1~-55.9	5.4~7.2	24.5~31.5			293~322	5.4~8.4
DWG-2	I				-4.9~-2.2		191~346	3.7~7.7
DWG-4	I				-5.1~-2.5		209~342.1	4.2~8.0
	II	-59.0~-56.8	3.2~6.8	27.5~31.4			298.5~334	6.1~11.7
YT-2	I				-9.0~-1.9		164~290	3.2~12.8
YT-3	I				-10.6~-8.5		220.3~287.6	12.3~14.6

注明：I—气液两相包裹体；II—CO₂包裹体；III—含石盐子晶三相包裹体；IV—含石盐子晶 CO₂包裹体；Tm—固相 CO₂ 最后融化温度；Tcla—笼合物融化温度；Te—CO₂ 部分均一温度；Tice—冰融化温度；Td—石盐溶解温度；Th—完全均一温度。

裹体,均一温度相近,其组合可能指示成矿流体发生过 CO₂ 与水的不混溶。

石英—方解石—黄铁矿阶段样品以气液两相包裹体为主,完全均一温度 164~290℃,冰点-10.6~-1.9℃,盐度 (3.2~14.6) wt% NaCl equiv (表 1,图 7-A、7-D)。该阶段均一温度明显降低。

3.4 流体包裹体激光拉曼分析

主要对石英+黄铁矿阶段、闪锌矿+方铅矿+石英+方解石阶段样品进行了包裹体的气相成分激光拉曼测试(图 7),其结果表明,流体包裹体的气相成分复杂,出现 CO₂、H₂O、CH₄、H₂S 等。液相成分中除 H₂O 外,还出现 HS⁻。气相成分和液相成分指示铅锌矿沉淀时,成矿流体处于还原状态。

4 S、Pb 同位素组成

4.1 样品及分析方法

用于 S、Pb 同位素组成分析的矿石样品采自坑道脉状矿体中,样品新鲜。呈条带状、角砾状构造,

中—粗粒结构,金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿;脉石矿物主要为石英和方解石。样品破碎至 40~60 目,清洗、干燥之后在双目镜下挑选单矿物闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等,纯度达 98%以上。

硫化物 S、Pb 同位素组成分析在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质开放研究实验室完成。S 同位素分析采用 SO₂ 法进行,先用直接氧化法将矿物中硫转化成 SO₂,然后进入 Finnigan MAT-251 同位素质谱仪测试,结果采用国际标准 CDT 表达,分析精度优于±0.2‰,分析结果见表 2。Pb 同位素测试所用仪器为 Nu Instrument HR,NBS 981 标准重复测试结果(±2σ):²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb=2.1674±0.004,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb=0.91478±0.0018,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb=16.9402±0.007,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb=15.4966±0.0030,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb=36.7155±0.012。分析结果见表 3(其中同时列出区内元古界、燕山期钼矿化斑岩体的前人测试数据)。

4.3 S 同位素组成的成矿学意义

赤土店铅锌矿石中硫化物样品的硫同位素组成

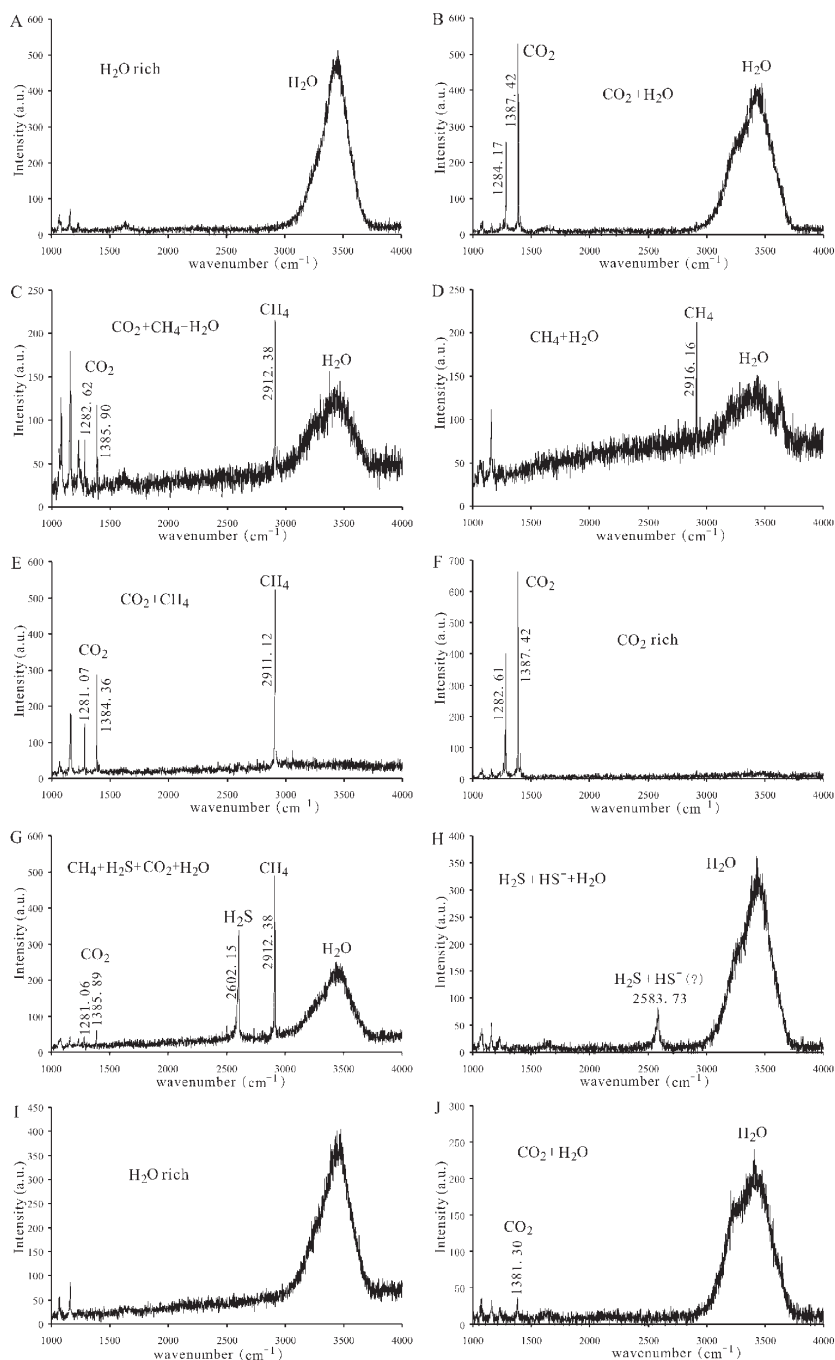


图 7 流体包裹体激光拉曼光谱

A—石英中气液两相包裹体水蒸气的光谱(07-30);B—石英中气液两相包裹体气相部分显示 CO_2 和水光谱(07-30);C—石英中气液两相包裹体气相部分显示 CO_2 、 CH_4 和水光谱(YT-4);D—石英中气液两相包裹体气相部分显示 CH_4 和水光谱(YT-4);E—石英中气液两相包裹体气相部分显示 CO_2 和 CH_4 , 怀疑为 CO_2 包裹体(YT-4);F—石英中 CO_2 包裹体气相部分显示 CO_2 (07-30);G—石英中气液两相包裹体气相部分显示 CH_4 、 H_2S 、 CO_2 和水光谱(07-30);H—包裹体 G 液相部分显示峰值 2583.17cm^{-1} ($\text{H}_2\text{S} + \text{HS}^-$) 和水光谱;I—含石盐子晶三相包裹体气相部分显示水光谱(07-30);J—含石盐子晶 CO_2 包裹体(四相)气相部分显示 CO_2 和水光谱

Fig.7 Raman spectra of fluid inclusions in Chitudian samples

A—Spectrum of gas phase from an inclusion of type I in quartz sample 07-30, showing H_2O bend;B— CO_2 peaks and H_2O bend from an inclusion of type I in quartz sample 07-30, showing CO_2 peaks, CH_4 peak, and H_2O bend;D—Spectrum from an inclusion of type I in quartz sample YT-4, showing CH_4 peak and H_2O bend;E—Spectrum of gas phase from an inclusion of type I in quartz in sample YT-4, showing CO_2 peaks and CH_4 peak;F—Spectrum of gas phase from an inclusion of type II in quartz in sample 07-30, showing CO_2 peaks;G—Spectrum of gas phase from an inclusion of type ? in quartz in sample 07-3, showing CH_4 peak, H_2S peak, CO_2 peaks, and H_2O bend;H—Spectrum of liquid phase from the same inclusion as the above (G), showing a peak at 2583.17cm^{-1} ($\text{H}_2\text{S} + \text{HS}^-$) and H_2O bend;I—Spectrum of gas phase from an inclusion of type III in quartz sample 07-30, showing H_2O bend;J—Spectrum of gas phase from an inclusion of type IV in quartz sample 07-30, showing H_2O bend and CO_2 peak

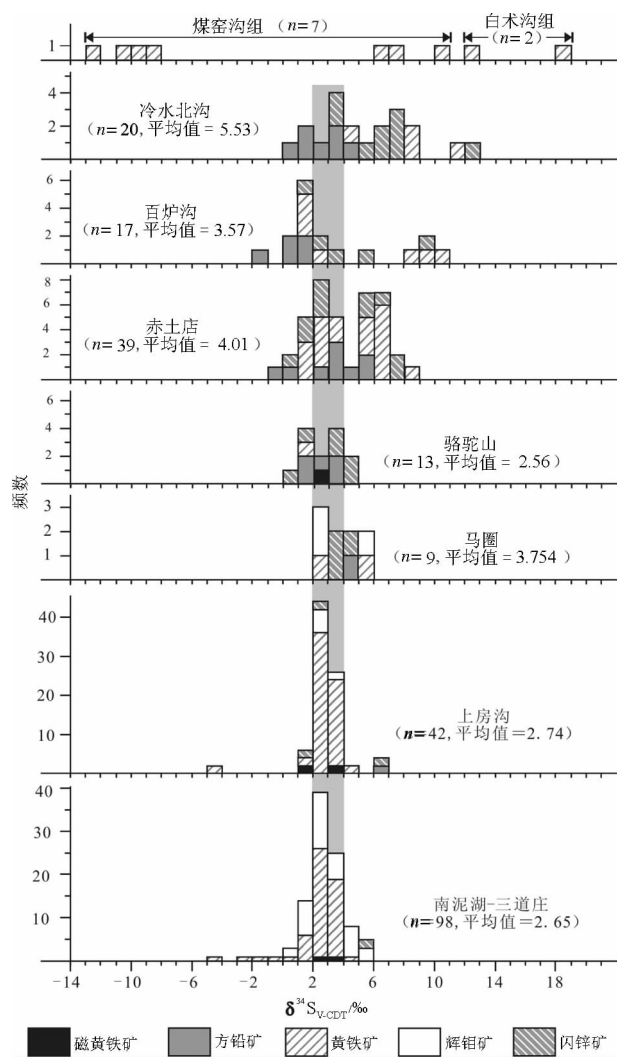


图8 栾川地区几个典型铅锌矿、斑岩钼矿及容矿地层中硫化物矿物硫同位素组成直方图(n 为数据个数)^[6]
注:煤窑沟组为石煤层中浸染状黄铁矿(自文献[24]);白术沟组为炭质千枚岩中结核状黄铁矿(自文献[15]);冷水北沟、赤土店、百炉沟和骆驼山4个铅锌矿的硫同位素数据来自表1;马圈为斑岩型钼矿(自文献[15]);上房沟和南泥湖—三道庄均为斑岩—矽卡岩型钼矿(自文献[15],[24])

Fig.8 $\delta^{34}\text{S}$ histogram of ore minerals of Mo-W and Pb-Zn deposits and diagenetic minerals in wall rocks of Luanchuan area (from Reference ^[6])

Note: Diagenetic pyrite comprises nodular pyrite in carbonaceous phyllite of Baishugou Formation (Reference [15]) and sparsely disseminated pyrite in stone coal of Meiyaogou Formation (Reference [24]). The Pb-Zn deposits consist of skarn type (Luotuoshan), WNW vein type (Chitudian and Bailugou), and NNE vein type (Lengshuibeiou) (Table 1). The Mo-W deposits are porphyry type or porphyry-skarn type, including Nannihu-Sandaozhuang, Shangfang, Majuan (Reference [15], [24])

呈双峰式分布(图8),39件样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化于0.20‰~8.30‰,平均3.93‰。在还原条件下,可以用闪锌矿的硫同位素近似代表热液系统总硫^[19],因为200~600℃内,闪锌矿与热液系统中 H_2S 的硫同位素分馏值很小(0.13‰~0.45‰)。激光拉曼分析证实赤土店铅锌矿石中石英、方解石内流体包裹体气相成分含 H_2S 、 CH_4 ,证明成矿流体为还原性流体, H_2S 可以成为主要含硫物种。赤土店铅锌矿闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化于0.37‰~4.20‰,具有岩浆硫的特点。

段士刚等(2010)^[6]经研究认为,本区铅锌硫化物中硫主要来自深部岩浆,脉型矿石硫有少量地层来源硫加入。如本区以南泥湖—三道庄、上房沟和马圈等为代表的燕山期斑岩型、斑岩—矽卡岩型钼矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值呈典型的塔式分布,峰值集中在2‰~4‰(图8)。而本区地层官道口群白术沟组炭质千枚岩中结核状黄铁矿两个样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为12.43‰和18.63‰^[15],栾川群煤窑沟组石煤层中浸染状立方体自形晶黄铁矿7个样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于-12.4‰~10.5‰,并且分别集中在-13‰~-8‰和6‰~11‰两个区间,没有近零值的样品(图8)。可见,本区地层中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值或者为较小的负值,反映有机还原硫酸盐的硫同位素特点,或者为较大的正值,反映热化学还原硫酸盐的硫同位素特征,因为热化学还原中还原硫与硫酸盐之间的同位素分馏很小甚至没有^[20-22]。而赤土店矿床硫同位素组成呈双峰式分布,其中一峰与区内斑岩矿床硫同位素峰重合,另一峰向地层热化学还原硫方向偏移(图8),反映硫有深部岩浆和地层两种来源。

利用硫同位素温度计($10^3 \ln \alpha_{\text{闪锌矿-方铅矿}} = 7.0 \times 10^5 T^{-2}$;转引自文献[20]),从赤土店铅锌矿S01号矿体内被矿相学研究证实共生的方铅矿—闪锌矿矿物对计算出它们平衡晶出的温度为388.29℃,这一温度值与利用矿石中共生脉石矿物流体包裹体均一温度高温部分接近。这种较高的温度与闪锌矿呈黑色,并且其中固溶体常分离出黄铜矿等矿相学事实相统一。通常闪锌矿中黄铜矿的出溶温度为350℃~400℃^[23]。

4.4 Pb同位素组成的成矿学意义

由表3可见,赤土店矿床29个铅同位素数据变化范围为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.005\sim17.953$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.414\sim15.587$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.948\sim39.036$;铅同位素

表 2 赤土店铅锌矿硫化物硫同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic composition of the Chitudian Pb–Zn deposit

序号	样号	矿物	位置	d ³⁴ S _{V-CDT} /‰	来源	序号	样号	矿物	位置	d ³⁴ S _{V-CDT} /‰	来源
1	07—10	闪锌矿	S01	2.8	本文	21	Sct1-1	方铅矿	西沟	5.7	a
2	07—11	黄铁矿	S01	2.3	本文	22	Sct1-3	闪锌矿	西沟	7.2	a
3	07—14	闪锌矿	S01	5.8	本文	23	Sct-21	方铅矿	西沟	4.2	a
4	07—24	黄铁矿	S139	5.9	本文	24	Sct-22	黄铁矿	西沟	6.8	a
5	07—24	闪锌矿	S139	5.1	本文	25	Sct-23	闪锌矿	西沟	7.2	a
6	07—25	黄铁矿	S139	6.6	本文	26	CM13010-K10	黄铁矿	S130	6.84	b
7	07—26	黄铁矿	S139	5.6	本文	27	CM13010-K11	黄铁矿	S130	6.86	b
8	07—28	黄铁矿	S139	5.3	本文	28	CM13010-K4	方铅矿	S130	3.08	b
9	07—5	闪锌矿	S01	1.8	本文	29	CM13010-K6	方铅矿	S130	3.73	b
10	07—5	方铅矿	S01	0.2	本文	30	MD896-K2	黄铁矿	S896	2.44	b
11	07—6	闪锌矿	S01	2.2	本文	31	MD896-K3	黄铁矿	S896	6.43	b
12	07—9	闪锌矿	S01	6.2	本文	32	MD896-K5	黄铁矿	S896	2.22	b
13	DWG-2	黄铁矿	S896	1.3	本文	33	MD896-K6	方铅矿	S896	-0.32	b
14	DWG-3	黄铁矿	S896	1.1	本文	34	YCM2-K4	黄铁矿	S130	3.88	b
15	DWG-3	闪锌矿	S896	0.8	本文	35	YCM2-K5	黄铁矿	S130	6.64	b
16	DWG-4	黄铁矿	S896	1.7	本文	36	Y4	方铅矿	S01	5.3	c
17	DWG-4	闪锌矿	S896	1.7	本文	37	Y10	方铅矿	S01	2.1	c
18	YT-3	黄铁矿	S01	2.5	本文	38	Y12	方铅矿	S01	3.1	c
19	YT-3	闪锌矿	S01	2.3	本文	39	Y13	黄铁矿	S01	8.3	c
20	YT-5	黄铁矿	S01	3.4	本文						

注:a 引自文献[1];b 引自文献[16];c 祁进平(2006),转引自文献[16]。

数据变化范围较小。

流体包裹体和 S 同位素研究指示赤土店矿床的形成与燕山期斑岩侵入有关。假定铅锌矿床年龄为 150 Ma(本区斑岩侵入年龄),根据 Stacey–Kramers (1975)^[25] 两阶段模式计算,赤土店矿床矿石样品 $\mu=7.79\sim9.05$, 平均 9.61; $\omega=34.73\sim40.35$, 平均 37.84。矿床的 μ 值均低于平均地壳 μ 值(9.74), ω 值大部分高于平均地壳铅的 ω 值(36.84),少量低于该值,具有混源特征。通常,具有低 μ 值的铅可能来自下部地壳或上地幔^[25],低 μ 高 ω 被认为是下地壳的特征^[26–28]。因此,上述脉状铅锌矿铅同位素组成低 μ 值、高 ω 值的特征指示了矿石铅来源于富 Th 亏 U 的源区,整体上具有下地壳来源特征。

区内元古宇栾川群和官道口群全岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.694\sim19.249$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.467\sim15.585$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.303\sim41.104$,变化范围大,富放射性成因铅。南泥湖岩体普通铅矿物钾长石、黄铁矿、方铅矿的铅同位素变化范围为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.189\sim17.894$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.381\sim15.569$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.655\sim39.01$,变化范围小。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上(图 9),元古宇岩石和斑岩体的铅同位素组成分别构成两个重叠很少的范围;A 为元古宇岩石铅同位素范围,富放射性成因铅;B 为斑岩铅同位素范围。即使对元古宇岩石铅

同位素组成进行 150 Ma (本区燕山期斑岩侵位年龄)的改正,A 范围的位置变化也不大。所以可以直接当作源区用来示踪。赤土店矿床铅同位素主要落于斑岩铅范围内,少量落入元古宇岩石铅范围内。这指示了赤土店脉状铅锌矿成矿物质可能主要来自斑岩,还有部分来自地层。

5 总 结

从矿床地质特征看,由于控矿要素和矿体产状不同,赤土店矿床铅锌矿表现出两种矿化类型,即北西西向断裂构造控制的脉状铅锌矿,和石宝沟岩体外围矽卡岩带中的铅锌矿化。在空间上围绕斑岩体往外,构成近斑岩体发育矽卡岩型钼矿化,远离斑岩体接触带的围岩矽卡岩中发育矽卡岩型多金属矿床,在斑岩体外围的断裂带中发育脉型铅锌银矿床的空间分布或分带规律。矿床的形成与斑岩体存在成生关系。矿物特征、流体包裹体和 S、Pb 同位素同样支持该结论。脉状矿体与矽卡岩中闪锌矿均呈深棕色–黑色,具高温特征。流体包裹体研究显示,成矿阶段温度较高(290~340℃),流体含大量 CO₂,并发生过流体不混溶分离。S 同位素组成显示,硫有深部岩浆和地层两种来源。被矿相学研究证实共生的方铅矿–闪锌矿矿物对计算出平衡温度为

表 3 赤土店铅锌矿床及围岩地层、斑岩铅同位素组成

Table 3 Lead isotope composition of strata, porphyry, and the Chitudian lead-zinc deposit

矿床	样品号	对象	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	ω	κ	来源
赤土店	DWG-2	方铅矿	17.6575	15.5213	38.5252	8.65	37.71	4.36	本文
	DWG-3	方铅矿	17.6236	15.5195	38.4985	8.61	37.58	4.36	
	DWG-4	方铅矿	17.6451	15.5212	38.5214	8.64	37.69	4.36	
	07-11	方铅矿	17.3834	15.4908	38.3044	8.29	36.57	4.41	
	07-13	方铅矿	17.8247	15.5287	38.8906	8.88	39.60	4.46	
	07-28	方铅矿	17.9253	15.5387	39.0357	9.01	40.35	4.48	
	07-35	方铅矿	17.905	15.5348	38.9543	8.98	39.93	4.45	
	CM13010-K3	黄铁矿	17.953	15.47	38.884	9.05	39.57	4.37	
	CM13010-K4	方铅矿	17.882	15.466	38.787	8.95	39.07	4.36	[16]
	CM13010-K6	方铅矿	17.87	15.467	38.77	8.94	38.98	4.36	
	CM13010-K10	黄铁矿	17.911	15.479	38.897	8.99	39.64	4.41	
	CM13010-K11	黄铁矿	17.949	15.507	39.035	9.04	40.35	4.46	
	YCM2-K3	方铅矿	17.69	15.437	38.494	8.70	37.55	4.32	
	YCM2-K4	黄铁矿	17.609	15.45	38.461	8.59	37.38	4.35	
	YCM2-K5	黄铁矿	17.685	15.49	38.665	8.69	38.44	4.42	
	YCM2-K7	黄铁矿	17.005	15.43	37.948	7.79	34.73	4.46	
	MD896-K2	黄铁矿	17.57	15.498	38.439	8.54	37.27	4.37	[16]
	MD896-K3	黄铁矿	17.636	15.43	38.196	8.63	36.01	4.18	
	MD896-K5	黄铁矿	17.586	15.469	38.388	8.56	37.00	4.32	
	MD896-K6	方铅矿	17.537	15.49	38.422	8.49	37.18	4.38	
	Y04	方铅矿	17.488	15.414	38.379	8.43	36.96	4.38	
	Y10	方铅矿	17.567	15.502	38.485	8.53	37.51	4.40	
	Y12	方铅矿	17.504	15.429	37.984	8.45	34.92	4.13	
	Y13	黄铁矿	17.214	15.472	38.198	8.06	36.02	4.47	[29]
		方铅矿	17.662	15.581	38.996	8.66	40.15	4.64	
		方铅矿	17.356	15.541	38.449	8.25	37.32	4.52	
		方铅矿	17.475	15.526	38.396	8.41	37.05	4.40	
		方铅矿	17.699	15.587	38.713	8.71	38.68	4.44	
		方铅矿	17.241	15.458	38.213	8.10	36.10	4.46	
栾川群	200416	全岩	18.215	15.648	38.35	9.11	35.44	3.89	[16]
	200418	全岩	19.249	15.684	41.104	10.44	49.15	4.71	
	200421	全岩	17.998	15.56	38.979	8.83	38.57	4.37	
	200438	全岩	18.217	15.635	38.598	9.11	36.68	4.02	
	S139-3	全岩	17.694	15.525	38.692	8.44	37.15	4.40	
	200439	全岩	18.868	15.685	38.303	9.95	35.21	3.54	
	Y02	全岩	17.735	15.468	38.631	8.49	36.84	4.34	[16]
	Y03	全岩	18.071	15.482	38.905	8.92	38.21	4.28	
	Y21	全岩	17.736	15.478	38.463	8.49	36.01	4.24	
	Y22	全岩	17.742	15.467	38.493	8.50	36.16	4.25	
官道口群	20043b	全岩	18.103	15.634	38.316	8.97	35.27	3.93	[16]
	S116-1	全岩	18.738	15.672	39.094	9.78	39.15	4.00	
	B3	全岩	17.937	15.498	38.84	8.75	37.88	4.33	[16]
	B26	全岩	18.296	15.508	39.272	9.21	40.03	4.34	
	B27	全岩	18.086	15.501	38.667	8.94	37.02	4.14	
	B28	全岩	18.443	15.505	39.179	9.40	39.57	4.21	
	B29	全岩	18.326	15.506	39.043	9.25	38.89	4.20	
南泥湖斑岩	ZK705	钾长石	17.189	15.381	37.655	8.03	33.22	4.14	[15]
	γ-1	钾长石	17.499	15.427	37.843	8.44	34.19	4.05	
	DF-2	方铅矿	17.45	15.54	39.01	8.38	40.22	4.80	
	N-013	黄铁矿	17.605	15.421	37.71	8.58	33.50	3.90	
	DF-2	方铅矿	17.45	15.54	39.01	8.38	40.22	4.80	[16]
	J-5	钾长石	17.806	15.569	38.508	8.85	37.63	4.25	
	J-4	钾长石	17.894	15.482	38.093	8.97	35.48	3.96	

注:特征值计算采用 Stacey&Kramers(1975)^[29]两阶段模式,斑岩、铅锌矿床年龄假定为 150 Ma。

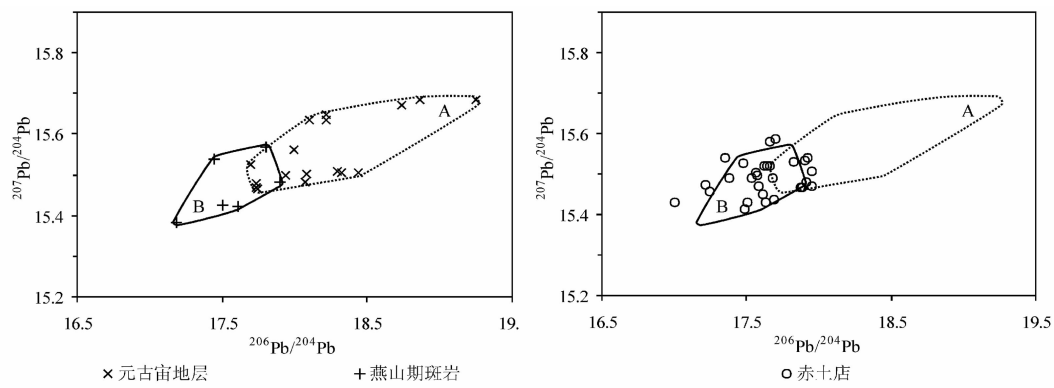


图 9 赤土店铅锌矿床及围岩地层、斑岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解
A—地层来源铅同位素组成范围(虚线);B—燕山期斑岩铅同位素组成范围(实线)
Fig.9 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ of minerals and whole rock samples from the Chitidian ore deposit
A—Pb isotope composition of the wall rocks of Luanchuan and Guandaokou groups (dash line); B—Pb compositions of porphyry or porphyry type ore in the Nannihu ore deposit (solid line)

388.29℃,具高温特征。Pb 同位素研究反映,脉状铅锌矿成矿物质可能主要来自斑岩,部分来自地层。

总之,矿床地质、流体包裹体和 S、Pb 同位素研究显示,赤土店矿床为与燕山期斑岩有关的铅锌矿,其脉状矿体为岩浆热液充填—交代成因类型。

致谢:在流体包裹体测试过程中得到张文淮老师、张德会老师和诸惠燕老师的热心指导和帮助,在此表示诚挚的感谢!

参考文献(References):

[1] 燕长海. 东秦岭铅锌银成矿系统内部结构[M]. 北京:地质出版社, 2004:1-72.
Yan Changhai. Study on Inner Structure of Lead-zinc-silver mineralization Aystem in Eastern Qinling [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2004:1-72(in Chinese with English abstract).
[2] 吕文德, 赵春和, 孙卫志, 等. 河南栾川地区矽卡岩型铅锌矿地质特征—南泥湖钼矿外围找矿问题 [J]. 地质调查与研究, 2005, 28 (1): 25-31.
Lv Wende, Zhao Chunhe, Sun Weizhi, et al. Characters of the Skarn Pb-Zn deposit in Luanchuan County, Henan Province [J]. Geological Survey and Research, 2005, 28 (1): 25-31 (in Chinese with English abstract).
[3] 吕文德, 赵春和, 孙卫志, 等. 豫西南泥湖多金属矿田铅锌矿地质特征与成因研究[J]. 矿产与地质, 2006, 20(3):219-226.
Lv Wende, Zhao Chunhe, Sun Weizhi, et al. Geological characteristics and genesis of Nannihu lead zinc polymetallic ore field in West Henan [J]. Mierial Resources and Geology, 2006, 20 (3):219-226(in Chinese with English abstract).
[4] 王长明, 张寿庭, 邓军, 等. 河南冷水北沟铅锌矿地质地球化学特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 2007, 26(4):175-183.

Wang Changming, Zhang Shouting, Deng Jun, et al. Geological-geochemical features and genesis of Lengshuibegou Pb-Zn deposit in Henan [J]. Mineral Deposits, 2007, 26 (4):175-183 (in Chinese with English abstract).
[5] 段士刚, 薛春纪, 燕长海, 等. 华北陆块南、北边缘铅锌成矿特征对比[J]. 矿床地质, 2008, 27(3):383-398.
Duan Shigang, Xue Chunji, Yan Changhai, et al. Comparison of Pb-Zn metallogenic characteristics between northern and southern margins of North China Landmass [J]. Mineral Deposits, 2008, 27 (3):383-398 (in Chinese with English abstract).
[6] 段士刚, 薛春纪, 刘国印, 等. 河南栾川地区铅锌矿床地质和硫同位素地球化学[J]. 地学前缘, 2010, 17(2):375-384.
Duan Shigang, Xue Chunji, Liu Guoyin, et al. Geology and sulfur isotope geochemistry of lead-zinc deposits in Luanchuan district, Henan Province, China [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 375-384(in Chinese with English abstract).
[7] 刘国印, 燕长海, 宋要武, 等. 河南栾川赤土店铅锌银矿床特征及成因探讨[J]. 地质调查与研究, 2007, 30(4):263-270.
Liu Guoyin, Yan Changhai, Song Yaowu, et al. Characteristics and genesis of Chitudian lead-zinc deposits in Luanchuan county [J]. Geological Survey and Research, 2007, 30(4):263-270(in Chinese with English abstract).
[8] 祁进平, 陈衍景, 倪培, 等. 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 岩石学报, 2007, 23(9):2119-2130.
Qi Jinping, Chen Yanjing, Ni Pei, et al. Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengshuibegou Pb-Zn-Ag deposit, Henan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (9):2119-2130(in Chinese with English abstract).
[9] 河南省地质矿产局. 河南省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1990:633-634.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province. Regional Geology of Henan Province [M]. Beijing:Geological

- Publishing House, 1990:633–634(in Chinese with English abstract).
- [10] 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京:地质出版社, 1994:112–116.
- Zhang Zongqing, Liu Dunyi, Fu Guomin. Isotopic Dating of Metamorphic Strata in North Qinling, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:112–116(in Chinese).
- [11] 杨荣勇, 徐兆文, 任启江. 东秦岭地区宝石沟和火神庙岩体的时代及岩浆物质来源[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(1): 15–18.
- Yang Rongyong, Xu Zhaowen, Ren Qijiang. Ages and magma sources of Shibagou and Huoshenmiao complexes in east Qinling [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1997, 16 (1):15–18(in Chinese with English abstract).
- [12] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 169–188.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1):169–188(in Chinese with English abstract).
- [13] 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 等. 华北与华南古板块拼合带地质与成矿[M]. 南京:南京大学出版社, 1988:285.
- Hu Shouxi, Lin Qianlong, Chen Zeming, et al. Geology and Metallogeny of the Collision Belt between North China and South China Plates [M]. Nanjing:Nanjing University Press, 1988:285(in Chinese with English abstract).
- [14] 刘孝善, 吴澄宇, 黄标. 河南栾川南泥湖—三道幢钼(钨)矿床热液系统的成因与演化[J]. 地球化学, 1987, (3):199–207.
- Liu Xiaoshan, Wu Chengyu, Huang Biao. Origin and evolution of the hydrothermal system in Nannihu—Sandaozhuang molybdenum (tungsten) ore deposit, Luanchuan County, Henan Province [J]. Geochimica, 1987, (3):199–207(in Chinese with English abstract).
- [15] 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 等. 中国钼矿床[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 1991:108–132, 400–413.
- Luo Mingjiu, Zhang Fumin, Dong Qunying, et al. Molybdenum deposits in China[M]. Zhengzhou:Henan Science and Technology Press, 1991:108–132,400–413(in Chinese with English abstract).
- [16] 刘国印. 华北陆块南缘铅锌银成矿规律及找矿方向研究 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2007.
- Liu Guoyin. The Pb–Zn–Ag Metallogeny and Prospecting Target in the South Margin of North China Craton [D]. Beijing:China University of Geosciences (Beijing), 2007(in Chinese with English abstract).
- [17] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusion [M]. Beijing:Science Press, 2004(in Chinese).
- [18] Heyen G, Ramboz C, Dubessy J. Simulation des équilibres de phase dans le système $\text{CO}_2\text{--CH}_4$ en dessous de 50°C et de 100bar, Applications aux inclusions fluids [J]. CR Acad Sci Paris Ser II, 1982, 294:203–206.
- [19] Ohmoto H, Rye R O. Isotope of sulfur and carbon[C]//Barnes R D (ed.). Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposit, 2nd Edition. John Wiley and Sons. New York, 1979:509–567.
- [20] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1985:23–151.
- Zhang Ligang. The Application of the Stable Isotope to Geology—the Hydrothermal Mineralization of Metal Activation and Its Prospecting [M]. Xi'an:Shaanxi Science and Technology Publishing House, 1985: 23–151(in Chinese).
- [21] Ohmoto H, Kaiser C J, Geer K A. Systematics of sulphur isotopes in recent marine sediments and ancient sediment-hosted base metal deposits[J]// Herbert H K, Ho S E(eds.). Stable isotopes and Fluid Processes in Mineralization. Geol. Dep. Univ. Extens., Univ. of Western Australia, 1990, 23:70–120.
- [22] Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry [M]. 4th edition, Springer Verlag, Berlin, 1997:201.
- [23] 徐国风. 矿相学教程 [M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1986: 133–146.
- Xu Guofeng. Instruction on Mineralography [M]. Wuhan:Wuhan Geological College Press, 1986:133–146(in Chinese).
- [24] 周作侠, 李秉伦, 郭抗衡. 华北地台南缘金(钼)矿床成因[M]. 北京:地震出版社, 1993:143–147.
- Zhou Zuoxia, Li Binglun, Guo Kangheng. Genesis of the Gold (molybdenum) Deposits in Southern Margin of the Northern China Platform[M]. Beijing:Seismological Press, 1993:143–147(in Chinese with English abstract).
- [25] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 26:207–221.
- [26] Doe B R, Zartman R E. Plumbotectonics 1. the Phanerozoic[C]// Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits 2nd(Ed). Wiley Interscience. 1979, 22–70.
- [27] Kamona A F, Lévêque J, Friedrich G, et al. Lead isotopes of the carbonate-hosted Kabwe, Tsumeb, and Kipushi Pb–Zn–Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damaran–Lufilian Fold Belt of Central Africa [J]. Mineralium Deposita, 1999, 34:273–283.
- [28] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3):73–81.
- Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, et al. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: a review [J]. Geology – Geochemistry, 2002, 30(3):73–81(in Chinese with English abstract).
- [29] 崔毫. 华北地台南缘(河南)有色、贵金属矿床铅同位素组成特征及成矿意义[J]. 矿产与勘查, 1991, (2):30–41.
- Cui Bo. Lead isotope compositions of non-ferrous and precious metallic deposits at the southern margin of the North China Platform [J]. Mineral Resources and Exploration, 1991, (2): 30–41 (in Chinese).
- [30] 张本仁, 李泽九, 骆庭川, 等. 豫西卢氏—灵宝地区区域地球化研究[M]. 北京:地质出版社,1987:185.
- Zhang Benren, Li Zejiu, Luo Tingchuan, et al. Regional Geochemical Study of Lushi–Lingbao District, Western Henan[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1987:185 (in Chinese with English abstract).

Geology, fluid inclusions and S, Pb isotopic geochemistry of the Chitudian Pb–Zn deposit in Luanchuan, Henan Province

DUAN Shi-gang¹, XUE Chun-ji¹, FENG Qi-wei¹,
GAO Bing-yu¹, LIU Guo-yin², YAN Chang-hai², SONG Yao-wu²

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450007, Henan, China)

Abstract: Numerous Pb–Zn ore veins were recently found in Luanchuan area, southwestern Henan Province. These veins host enormously huge resources of Pb and Zn. The Chitudian ore deposit is one of these newly-discovered Pb–Zn deposits. Its Pb–Zn ore veins are controlled mainly by WNW-trending fractures. Apart from Pb–Zn ore veins, skarn with Pb–Zn mineralization was also discovered recently in the ore deposit, but the economic value is lower than that of the ore veins. Considering that weak Mo mineralization occurs in skarn close to the intrusion in the ore deposit, the authors put forward a mineralization zoning: Mo mineralization in skarn occurs close to the intrusion, Pb–Zn polymetallic mineralization in skarn occurs away from the intrusion, and Pb–Zn mineralization in veins is controlled by fractures much more distant but is around the periphery of the intrusion. Petrography, microthermometry and laser Raman spectrometry of primary fluid inclusions show abundant content of CO₂ in the ore-forming fluid, immiscible separation of CO₂ and H₂O, and homogenization temperatures in a range of 290°C–340°C during lead–zinc mineralization. $\delta^{34}\text{S}$ of sulfides from the Chitudian lead–zinc ore deposit vary between –0.32‰ and 8.30‰ (averagely 4.01‰), and show a bimodal distribution with one peak consistent with the peaks of porphyry Mo–W deposits (2‰ to 4‰) and the other peak shifting the heavy $\delta^{34}\text{S}$ values to the values close to S content of strata (12.43‰ to 18.63‰), which may indicate that the S of lead–zinc ore veins have two main sources: a magmatic source and a stratigraphic source. In addition, a pair of paragenetic sphalerite and galena from an ore vein gives a high sulfur isotope equilibrium temperature of 388.29°C. The Pb isotopic compositions of the Chitudian lead–zinc ore deposit are scattered in a relatively small range ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.005\text{--}17.953$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.414\text{--}15.587$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.948\text{--}39.036$), which accords mainly with the zone defined by Yanshannian porphyry, suggesting that the metals might have been mainly derived from Yanshannian porphyry intrusions, and partially from the strata. In conclusion, it is reasonable to hold that the Chitudian Pb–Zn deposit is genetically related to Yanshannian porphyry and the Pb–Zn ore veins are of magmatic hydrothermal filling–metasomatic genesis.

Key words: fluid inclusion; S and Pb stable isotopes; lead and zinc deposit; magmatic hydrothermal filling–metasomatic deposit; Chitudian; Luanchuan

About the first author: DUAN Shi-gang, male, born in 1983, doctoral candidate, engages in the study of mineral survey and prospecting; E-mail: dsg1102231@163.com.