

编号 0258-7106 (2010) 05-0810-17

# 河南栾川百炉沟铅锌矿床地质、流体包裹体和稳定同位素地球化学\*

段士刚<sup>1</sup>, 薛春纪<sup>1\*</sup>, 刘国印<sup>2</sup>, 燕长海<sup>2</sup>, 冯后伟<sup>1</sup>, 宋要武<sup>2</sup>, 高炳宇<sup>1</sup>

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 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** 百炉沟矿床是近年来在盛产斑岩-矽卡岩型钼矿床的河南栾川地区新发现的一处铅锌矿床, 位于豫西南牛心岭背斜之西侧, 与栾川地区的南泥湖、三道庄、上房沟、马圈等斑岩型及斑岩-矽卡岩型钼矿床相毗邻。矿体呈脉状、板状产在中元古界变质碳酸盐岩-碎屑岩层中, 受 NWW 向层间断裂构造控制。矿石由闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、石英、方解石等矿物组成。矿石中石英和闪锌矿所捕获的原生流体包裹体有富液体气液两相包裹体、富气体气液两相包裹体、纯气体包裹体、含子矿物三相包裹体等 4 种类型, 邻近分布, 其均一温度相近, 表明成矿过程中可能存在流体沸腾作用。气液两相包裹体的均一温度为 180~327℃, 以中温 (250~260℃) 为主; 盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 4.0%~14.0%, 以 5.0%~9.0% 为主。依据均一温度峰值所对应的压力 (38.94~44.87 MPa), 求得成矿深度为 1.44~1.66 km。表明该矿床明显具有浅成、中温、低盐度热液成矿的特征。单个流体包裹体的气相成分至少有纯  $\text{H}_2\text{O}$  蒸汽、 $\text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2 + \text{CO}_2$  和  $\text{N}_2 + \text{CH}_4$  等 4 种组合。矿石中石英和方解石内包裹体水的  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  为 -76‰~-90‰, 方解石的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  为 -0.44‰~1.80‰, 选取所对应的流体包裹体均一温度, 计算得到包裹体水的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  为 2.51‰~10.96‰, 反映出成矿流体的主体为岩浆热液。矿石中硫化物的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  为 -1.2‰~10.9‰, 其峰值 (1‰~2‰) 与该地区斑岩型钼矿床中的硫化物相近, 指示其具有岩浆来源硫的特征。矿石中硫化物  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.552\sim 18.426$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.451\sim 15.5794$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.264\sim 39.637$ , 反映出成矿金属主要来自于岩浆, 有少量地层岩石铅的加入。百炉沟铅锌矿床应属受层间构造控制的中温岩浆热液充填-交代矿床。

**关键词** 地质学 地球化学 流体包裹体 H、C、O、S、Pb 同位素 铅锌矿床 岩浆热液 百炉沟 栾川 河南

**中图分类号**: P618.42; P618.43

**文献标志码**: A

## Geology, fluid inclusions and stable isotopic geochemistry of Bailugou Pb-Zn deposit in Luanchuan area, Henan Province

DUAN ShiGang<sup>1</sup>, XUE ChunJi<sup>1</sup>, LIU GuoYin<sup>2</sup>, YAN ChangHai<sup>2</sup>, FENG QiWei<sup>1</sup>,  
SONG YaoWu<sup>2</sup> and GAO BingYu<sup>1</sup>

(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

The Bailugou lead-zinc deposit, a newly-discovered ore deposit in Luanchuan area, Henan Province, is well-known for its porphyry-skarn type molybdenum ore bodies. It is hosted in the west limb of the Niuxinduo dome-

\* 本文得到地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金 (GPRM200832)、高等学校学科创新引智计划 (B07011)、国家自然科学基金 (40772061、40472054)、长江学者和创新团队发展计划 (IRT0755) 的联合资助

第一作者简介 段士刚, 男, 1983 年生, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业。Email: dsq1102231@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。Email: chunji.xue@cugb.edu.cn

收稿日期 2009-10-22; 改回日期 2010-04-27。许德煊编辑。

like anticline, and is adjacent to the Nannihu, Sandaozhuang, Shangfanggou and Majuan porphyry-skarn type molybdenum deposits in this area. Ore bodies assume veinlike form and are hosted in Mesoproterozoic metamorphic carbonate-clastic rocks, apparently controlled by NWW-trending interlayer fractures. Ores mainly consist of sphalerite, galena, pyrite, quartz and calcite. Primary fluid inclusions trapped in quartz and sphalerite can be divided into four types: liquid-rich two-phase inclusions, gas-rich two-phase inclusions, pure gas inclusions and daughter-mineral bearing three-phase inclusions. These four types of inclusions are trapped in the same stage minerals, assume close distribution, and have similar homogenization temperatures, suggesting that boiling might have happened during mineralization. Thermometry of gas-liquid inclusions gives a range of homogenization temperature between 180 °C and 327 °C with the peak near mesothermal temperature (250 °C to 260 °C), and a range of salinity [ $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ ] from 4.0% to 14.0% (mostly between 5.0% and 9.0%). Using the pressure of the peak homogenization temperature (38.94 MPa to 44.87 MPa), the authors estimated that the mineralization depth lies between 1.44 km and 1.66 km. It is thus held that mesothermal temperature, low salinity and shallow mineralization depth characterize the Bailugou lead-zinc deposit. Laser Raman Spectrometer analysis shows that gas phase of single inclusions includes at least four types: pure  $\text{H}_2\text{O}$  vapor,  $\text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2 + \text{CO}_2$  and  $\text{N}_2 + \text{CH}_4$ .  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  values of fluid inclusion water in gangue minerals quartz and calcite are  $-76\text{‰}$  to  $-90\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  of gangue calcite are  $-0.44\text{‰}$  to  $1.80\text{‰}$ , and calculated  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  of fluid inclusion water using homogenization temperature are  $2.51\text{‰}$  to  $10.96\text{‰}$ , suggesting that ore-forming fluids are mainly magmatic solution.  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  values of ore sulfides are from  $-1.2\text{‰}$  to  $10.9\text{‰}$  and have a peak ( $1\text{‰}$  to  $2\text{‰}$ ) very close to the values of sulfides from the porphyry type molybdenum deposits in this area, implying a magmatic sulfur origin. Sulfides in ores have  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios  $17.552 \sim 18.426$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios  $15.451 \sim 15.5794$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios  $38.264 \sim 39.637$ , suggesting that the metallogenic metals were mostly derived from porphyries in this area with the participation of a certain amount of stratigraphic metals. The Bailugou lead-zinc deposit is a magmatic mesothermal filling-metasomatic type ore deposit controlled by interlayer fractures.

**Key words:** geology, geochemistry, fluid inclusion, H, C, O, S and Pb stable isotopes, lead and zinc deposit, magmatic-hydrothermal solution, Bailugou, Luanchuan, Henan Province

豫西南栾川地区是中国斑岩-矽卡岩型钼矿床最重要的矿集区之一,产有包括南泥湖、上房沟、三道庄等在内的多个大、中型钼(钨)矿床(罗铭玖等, 1991)。近年,该矿集区内铅锌多金属矿勘查进展明显,百炉沟就是新近发现的一处重要铅锌矿床。由于该地区铅锌矿勘查和研究起步较晚,故目前对铅锌多金属矿的成矿控制要素的认识存在分歧,主要是:受层位和古含水层系统的控制(燕长海等, 2004 2005) 受中酸性小岩体外围层状矽卡岩的控制(吕文德等, 2005) 受断裂破碎带及矽卡岩带的控制(王长明等, 2007) ;从早期到晚期由‘层控’向‘岩控’变化(段士刚等, 2008)等等。本文以百炉沟铅锌矿床为例,分析了矿床地质特征,观测了矿物流体包裹体,研究了矿床的 H、C、O、S、Pb 同位素组成,旨在探索铅锌成矿控制要素。

## 1 区域地质背景

百炉沟铅锌矿床位于华北陆块南缘卢氏-栾川-四里店陆缘褶断带内偏西部的牛心剝穹状背斜之西侧(燕长海, 2004)(图 1)。区内出露的地层由古到新主要为:太古界太华群杂岩,中元古界官道口群龙家园组、巡检司组、杜关组、冯家湾组和白术沟组,以及新元古界栾川群三川组、南泥湖组和煤窑沟组。

太华群杂岩为一套角闪岩相变质杂岩,主要岩性为角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、角闪岩及长英质片麻岩、变粒岩等。官道口群龙家园组为该区间内的主要地层,岩性比较简单,以硅质条带白云石大理岩及中厚层白云石大理岩为主;巡检司组主要由厚层状硅质条带结晶白云石大理岩构成,底部常见含砾

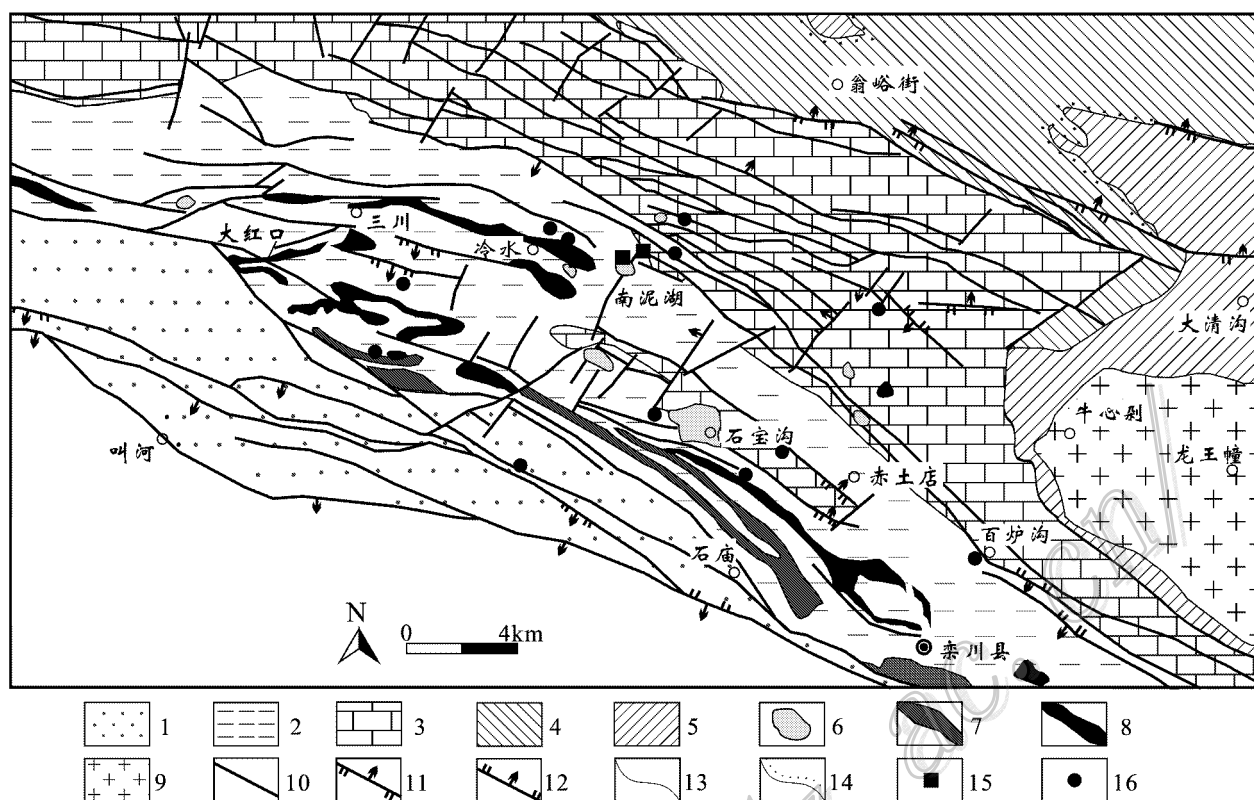


图 1 河南栾川地区区域地质矿产略图

1—震旦系陶湾群；2—新元古界栾川群；3—中元古界官道口群；4—中元古界熊耳群；5—太古界太华群；6—燕山期斑岩侵入体；7—新元古代正长斑岩；8—新元古代辉长岩；9—中元古代碱性花岗岩；10—断层；11—逆冲断层；12—正断层；13—地质界线；14—不整合接触；15—斑岩型钼矿床；16—铅锌矿床

Fig. 1 Regional geological and mineral resource sketch map of Luanchuan area, Henan Province

1—Sinian Taowan Group；2—Neoproterozoic Luanchuan Group；3—Mesoproterozoic Guandaokou Group；4—Mesoproterozoic Xiong'er Group；5—Archean Taihua Group；6—Yanshanian porphyry intrusion；7—Neoproterozoic syenite；8—Neoproterozoic gabbro；9—Mesoproterozoic alkaline granite；10—Fault；11—Thrust fault；12—Normal fault；13—Geological boundary；14—Unconformity；15—Porphyry-type Mo deposit；16—Pb-Zn deposit

岩屑砂岩、泥岩；杜关组主要为薄层状白云石大理岩，夹绢云母千枚岩及钙质千枚岩；冯家湾组主要为厚层状白云石大理岩、厚层状硅质条纹白云石大理岩夹变质石英白云石大理岩；白术沟组主要为绢云千枚岩夹绢云片岩、变质长石石英砂岩、长石石英岩、碳质千枚岩夹薄层状石英白云石大理岩。栾川群三川组以含石英细砾变质砂岩、大理岩为主，南泥湖组主要为钙质砂岩、变质石英砂岩、绢云钙质片岩、绢云母大理岩；煤窑沟组主要为白云石大理岩、钙质石英岩、变质细砂岩夹片岩，含 1~2 层石煤层。该区的铅锌矿体主要赋存在官道口群龙家园组和冯家湾组内。

该区的主体构造为牛心剝穹状背斜构造，它是

一个以太古界太华群杂岩及中元古代龙王幢钾长花岗岩体为核部、以官道口群地层为两翼的呈 NWW 向倾伏的背斜(图 1)。该区内的断裂构造以密集平行分布的 NWW 向或 NW 向断裂为主，其次为 NE 向及 NNE 向断裂。NWW 向或 NW 向断裂大多顺层发育，其与 NE 向断裂的交汇部位，往往是富矿赋存的部位(燕长海,2004)。

区内的太华群杂岩中侵入有古元古代末期—中元古代早期的龙王幢钾长花岗岩(锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $(1\ 602.1 \pm 6.6)$  Ma,包志伟等,2009)。该区南部侵入有晋宁期变辉长岩(全岩 K-Ar 年龄为 743 Ma<sup>①</sup>)。此外,区内还有许多呈 NW 向展布的燕山中晚期酸性岩株和岩脉(例如石宝沟似斑状二长

① 王世炎,刘振宏,武太安,张毅星,崔霄峰,付晓强. 2002. 内乡县幅 1:25 万区域地质调查报告. 河南省地质调查院. 214 页. 内部资料.

花岗岩,全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $(142.7 \pm 5.0)$  Ma, 杨荣勇等,1997 南泥湖花岗斑岩,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(158.2 \pm 3.1)$  Ma,毛景文等,2005)。龙王幢钾长花岗岩体以富含稀土元素为特征,已发现稀土元素矿化体多处(李先梓等,1993)。晋宁期变辉长岩中未发现与之有关的矿化。燕山中晚期酸性侵入岩体内发育有大量的斑岩型、斑岩 矽卡岩型钼钨矿床(罗铭玖等,1991 吕文德等,2004 王长明等,2007)。

2 矿床地质概况

百炉沟矿床发育有多条铅锌矿化带(图 2)。这些矿化带主要赋存在龙家园组和冯家湾组内,一般长 300~3 000 m,宽 2~6 m,局部构成工业矿体。矿化带主要受控于 NW 向的层间断裂带,少数受控于 NE 向断层,沿走向呈舒缓波状,并有分枝、错断

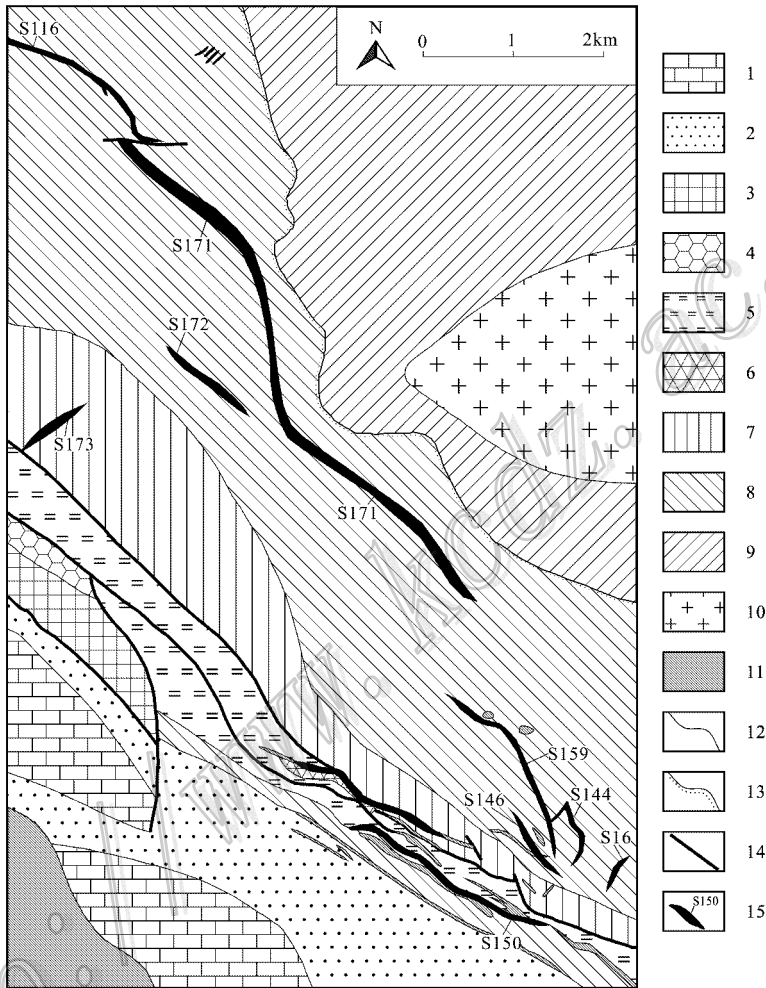


图 2 百炉沟铅锌矿床地质简图(据燕长海,2004)

1~3—新元古界栾川群:1—煤窑沟组;2—南泥湖组;3—三川组;4~8—中元古界官道口群:4—白术沟组;5—冯家湾组;6—杜关组;7—巡检司组;8—龙家园组;9—太古界太华群;10—中元古代钾长花岗岩;11—晋宁期变辉长岩;12—地质界线;13—不整合接触;14—断层;15—矿化带/矿体及编号

Fig. 2 Geologic sketch map of Bailugou Pb-Zn deposit

1~3—Neoproterozoic Luanchuan Group:1—Meiyaogou Formation;2—Nannihu Formation;3—Sanchuan Formation;4~8—Mesoproterozoic Guandaokou Group:4—Baishugou Formation;5—Fengjiawan Formation;6—Duguan Fromation;7—Xunjiansi Formation;8—Longjiayuan Formation;9—Archean Taihua Group;10—Mesoproterozoic alkaline granite;11—Jinning meta-gabbro;12—Geological boundary;13—Unconformity;14—Fault;15—Mineralized zone/ore body and its serial number

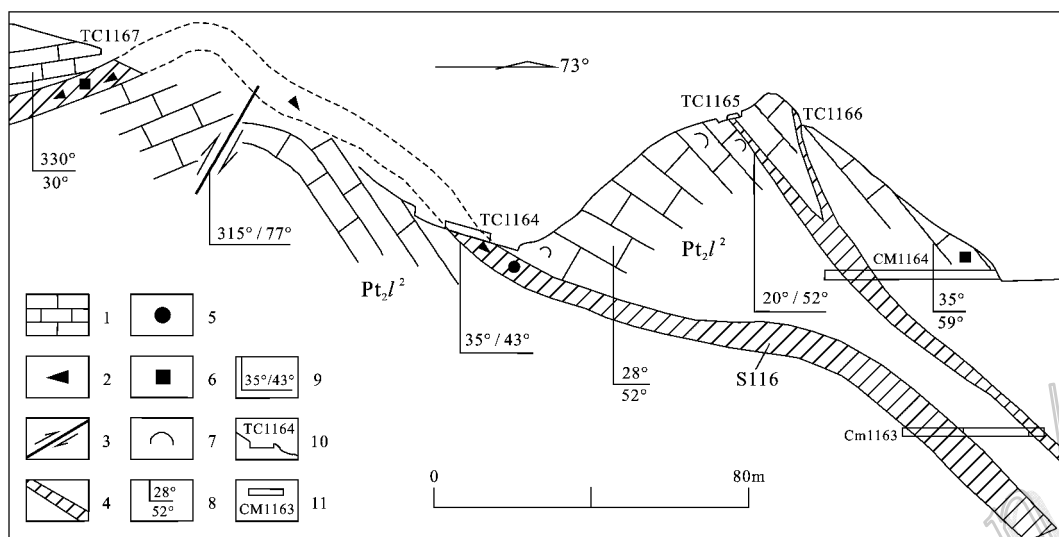


图 3 百炉沟铅锌矿床 S116 矿体剖面图(据燕长海,2004)

1—白云石大理岩;2—角砾岩;3—断层;4—矿体;5—赤铁矿化;6—褐铁矿化;7—软锰矿化;8—地层产状;9—构造产状;  
10—探槽及编号;11—穿脉坑道及编号

Fig 3 Exploratory profile of S116 ore-body in Bailugou Pb-Zn deposit.

1—Dolomite marble;2—Breccia;3—Fault;4—Ore body;5—Hematization;6—Limonitization;7—Pyrolusitization;8—Attitude of strata;  
9—Attitude of structure;10—Trench and its serial number;11—Across vein adit and its serial number

等现象,倾向 SW 或 NE,倾角 35~70°。硅化白云石大理岩和角砾状大理岩是主要的赋矿岩石,局部地段亦见(变)辉长岩脉内有矿化。

矿体呈脉状、板状(图 2、图 3),一般长 300~1 560 m,延深 210~450 m,厚 1~6 m。不同矿体的规模及品位变化较大,整个矿床的平均品位(质量分数)为:Pb 11.29%,Zn 5.58%,Ag  $183.32 \times 10^{-6}$ 。在断裂形态发生变化的部位,矿体常见分叉(图 3)、增厚的现象。在 NWW 向断层与 NE 向断层的交汇部位,往往是富矿赋存的部位(燕长海,2004)。

矿石构造主要有条带状构造(图 4A)、块状构造、斑杂状构造、角砾状构造(图 4B 和 4C)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,并交代黄铁矿,图 4D)、碎裂结构(闪锌矿呈碎裂状)、固溶体分离结构(黄铜矿在少量铁闪锌矿中呈串珠状、乳滴状固溶体,图 4E)等,矿物粒度具有随深度增加而变粗大的特点。角砾状构造表现为原条带状、斑杂状矿石破裂、破碎后,被晚阶段矿物胶结(图 4C);胶结物的金属矿物组成与角砾一致,但角砾中的闪锌矿呈褐黑色,而胶结物中的闪锌矿则呈黄褐色、浅黄色;胶结物的脉石矿物与角砾基本一致,但见有铁白云石(图 4B 和 4F,表 1)。矿石中的金属矿物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、

毒砂,其次为黄铜矿、辉银矿。脉石矿物主要为石英、方解石,次为铁白云石(图 4B 和 4F)、绢云母等。

矿化分带不甚明显,但从矿体垂向来看,具有下部为黄铁矿+石英组合,上部为闪锌矿+方铅矿+黄铁矿+石英+方解石组合的特征,并且,富锌矿段与富铅矿段常不重叠。矿体与围岩界线清楚。围岩蚀变类型主要为硅化、白云石化、方解石化和铁白云石化等。根据矿体的地质特征、矿物共生组合及矿石组构特点,可将矿化从早到晚粗略分为石英-黄铁矿、石英-方解石-闪锌矿-方铅矿以及石英-方解石 3 个热液成矿阶段。

### 3 流体包裹体

#### 3.1 样品和测试方法

5 件矿石样品直接采自百炉沟矿区 S150 矿体(图 2)的坑道。07-45 号样品采自该矿体下部,石英+黄铁矿是其基本矿物组合;07-46 号样品采自该矿体上部,石英+方解石+黄铁矿+(少量)闪锌矿是其基本矿物组合;07-47、07-48、07-49 号 3 个样品采自矿体中部斑杂状锌矿石。样品 07-45、07-46 代表了石英-黄铁矿阶段;样品 07-47、07-48、07-49 则代表了石英-方解石-闪锌矿-方铅矿阶段。未对无矿化



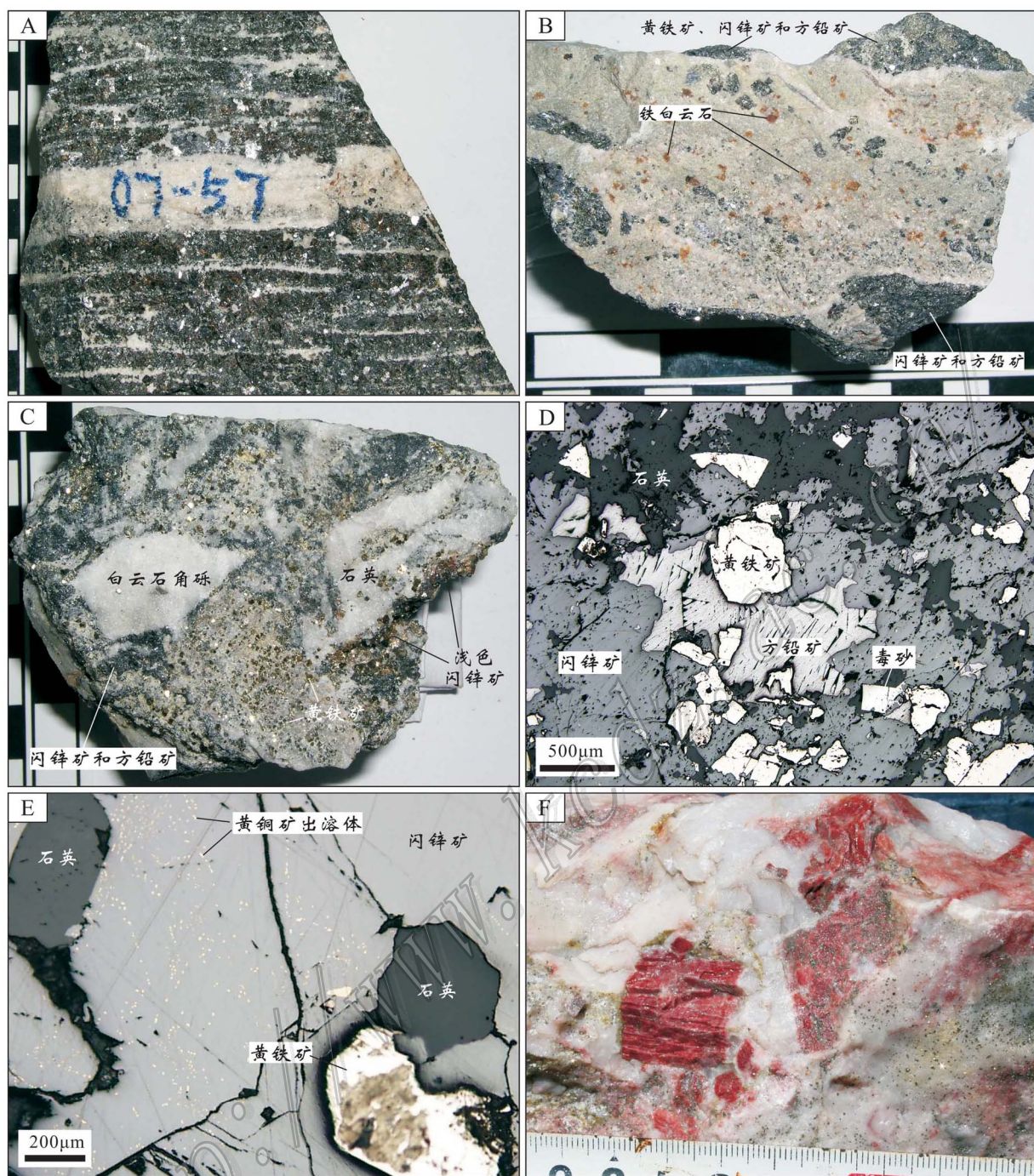


图 4 百炉沟铅锌矿床中矿石的矿物组合及组构照片

A. 条带状矿石, 黑色条带为闪锌矿和方铅矿; B. 角砾状矿石, 表现为原条带状、斑杂状矿石破碎后被晚阶段矿物胶结, 胶结物中有铁白云石; C. 角砾状矿石, 表现为原条带状、斑杂状矿石和白云石破碎后被晚阶段矿物胶结, 胶结物中的闪锌矿呈黄褐色; D. 闪锌矿与方铅矿共结, 并交代黄铁矿(单偏光); E. 黄铜矿在少量铁闪锌矿中呈串珠状、乳滴状固溶体, 构成固溶体分离结构(单偏光); F. 无矿化的石英-铁白云石脉, 红色者为铁白云石, 白色者为石英

Fig. 4 Photos of mineral associations and fabric of ores from Bailugou Pb-Zn deposit

A. Banded ore with black ribbons of sphalerite and galena; B. Breccia ore, breccia composed of formal banded ore; C. Breccia ore, breccia composed of formal banded ore and gangue dolomite; D. Sphalerite intergrowth with galena, both eroding pyrite (plainlight); E. Chalcopyrite occurring as solid exsolution in sphalerite (plainlight); F. Late stage barren quartz (white) and ferro-dolomite (red) vein

表 1 百炉沟铅锌矿床矿石中铁白云石的电子探针分析结果

Table 1 Electronic microprobe analyses of ferro-dolomite in ores from Bailugou Pb-Zn deposit

| 样品号   | 矿物   | $w(B)/\%$ |      |       |       |       | 分子式                                                    |
|-------|------|-----------|------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------|
|       |      | Fe        | Mn   | Mg    | Ca    | O     |                                                        |
| 07-53 | 铁白云石 | 7.88      | 2.17 | 9.12  | 22.38 | 17.83 | $Fe_{0.7597}Mn_{0.2127}Mg_{2.0202}Ca_{3.0065}[CO_3]_2$ |
| 07-51 | 铁白云石 | 4.83      | 0.87 | 11.48 | 23.61 | 18.62 | $Fe_{0.4459}Mn_{0.0816}Mg_{2.4351}Ca_{3.0371}[CO_3]_2$ |

测试仪器 EPMA-1600 型电子探针仪 测试单位 中国地质大学(北京)地质实验中心。

的石英-方解石阶段进行研究。将样品制作成双面抛光、厚度为 0.3 mm 的包裹体片,用于流体包裹体岩相学观测、显微测温及激光拉曼光谱分析。

流体包裹体测温和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/热台为英国 Linkman 公司生产的 THMSG600 型和 MDS600 型,测温范围为  $-196^{\circ}\text{C} \sim +600^{\circ}\text{C}$ ,精度及稳定性均在  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  之内。激光拉曼光谱仪为英国生产的 Renishaw inVia 型,514.5nm  $\text{Ar}^+$  激光器,扫描范围  $100 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率优于  $2\text{ cm}^{-1}$ ,重复性  $+0.2\text{ cm}^{-1}$ 。

3.2 流体包裹体岩相学

样品中流体包裹体比较丰富(图 5),大小多为  $2 \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ ,原生和次生皆有发育。原生流体包裹体形状多样,有三角形、正方形、椭圆形、枣核形、负晶形等,分布不均匀,常孤立产出或成群密集出现。次生流体包裹体常呈定向分布,一般小于  $2\text{ }\mu\text{m}$ 。在所采的 5 件矿石样品中,石英及闪锌矿内的原生流体包裹体可以分为 4 种类型:

I 类 富液体两相包裹体(图 5A),由气相和液相组成,气相分数为  $5\% \sim 30\%$ ,一般为  $10\%$ ,在诸样品中均有发育。加热后均一为液相。

II 类 富气体两相包裹体(图 5B 和 5D),由气相和液相组成,气相分数在  $60\%$  以上,仅在样品 07-47 中见到少量该类型包裹体。加热后均一为气相。

III 类 纯气体包裹体(图 5C),除样品 07-48 外,其他诸样品内均可见到。

IV 类 含子矿物三相包裹体(图 5E 和 5F),由气相、液相和石盐子晶组成,在样品 07-45、07-48 中发育,呈孤立状或三五成群产出。加热时子矿物先融化,然后气泡消失。

3.3 流体包裹体显微测温

此次工作主要测定了上述 5 件样品中石英和闪锌矿内的气液两相包裹体(类型 I、II)和含子矿物三相包裹体(类型 IV)的均一温度和冰点。测温中发

现,在温度高于  $350^{\circ}\text{C}$  时,有包裹体开始爆裂或泄漏,不能复原;当高于  $375^{\circ}\text{C}$  时,有较多包裹体开始爆裂。因而,本次测温一般不高于  $350^{\circ}\text{C}$ ,高于  $350^{\circ}\text{C}$  时就进行反复观测。

气液两相包裹体的测温结果见表 2,其均一温度及盐度分布图见图 6 和图 7。由表 2 和图 6 可见:① 在 2 件代表石英-黄铁矿阶段的样品(07-45、07-46)中,石英内流体包裹体的均一温度不同,但盐度相近,可能反映了早期石英-黄铁矿阶段温度的自然降低;② 在 3 件代表石英-方解石-闪锌矿-方铅矿阶段的样品(07-47、07-48、07-49)中,石英和闪锌矿内流体包裹体的均一温度相近,但闪锌矿内流体包裹体的盐度明显高于石英内流体包裹体的盐度,这可能反映了主成矿阶段硫化物沉淀时流体的盐度曾有过升高;③ 石英-黄铁矿阶段与石英-方解石-闪锌矿-方铅矿阶段相比,均一温度和盐度相似,气液两相包裹体的均一温度以中温为主,范围为  $180 \sim 327^{\circ}\text{C}$ ,峰值为  $250 \sim 260^{\circ}\text{C}$ ;盐度较低, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  范围为  $4.0\% \sim 14.0\%$ ,以  $5.0\% \sim 9.0\%$  为主,成矿流体为中温、中-低盐度流体。均一温度-盐度双变量图(图 7)大致显示出其盐度与均一温度呈正相关关系。

对含子矿物三相包裹体共测得 3 组数据。其中,样品 07-45 有 2 组数据,其石盐融化温度和完全均一温度分别为  $119.2^{\circ}\text{C}$  和  $363.4^{\circ}\text{C}$ 、 $173.4^{\circ}\text{C}$  和  $260.1^{\circ}\text{C}$ ,查表得到其盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  分别为  $28.56\%$  和  $30.63\%$ (卢焕章等,2004),其主矿物为石英。样品 07-48 有 1 组数据,石盐融化温度和完全均一温度为  $244^{\circ}\text{C}$  和  $256^{\circ}\text{C}$ ,查表得到其盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为  $34.31\%$ ,其主矿物为闪锌矿。

应用刘斌等(1999)计算流体密度的经验公式: $\rho = A + B \times t + C \times t^2$  [ $\rho$  为密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), $t$  为均一温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $A$ 、 $B$ 、 $C$  为盐度的函数],计算得到各样品的密度。计算结果(表 2)表明,各样品的密度颇为接近,范围为  $0.74 \sim 0.94\text{ g}/\text{cm}^3$ ,平均值为  $0.82 \sim 0.88\text{ g}/\text{cm}^3$ 。该结果与利用  $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$  体系的  $t-\rho$  相图



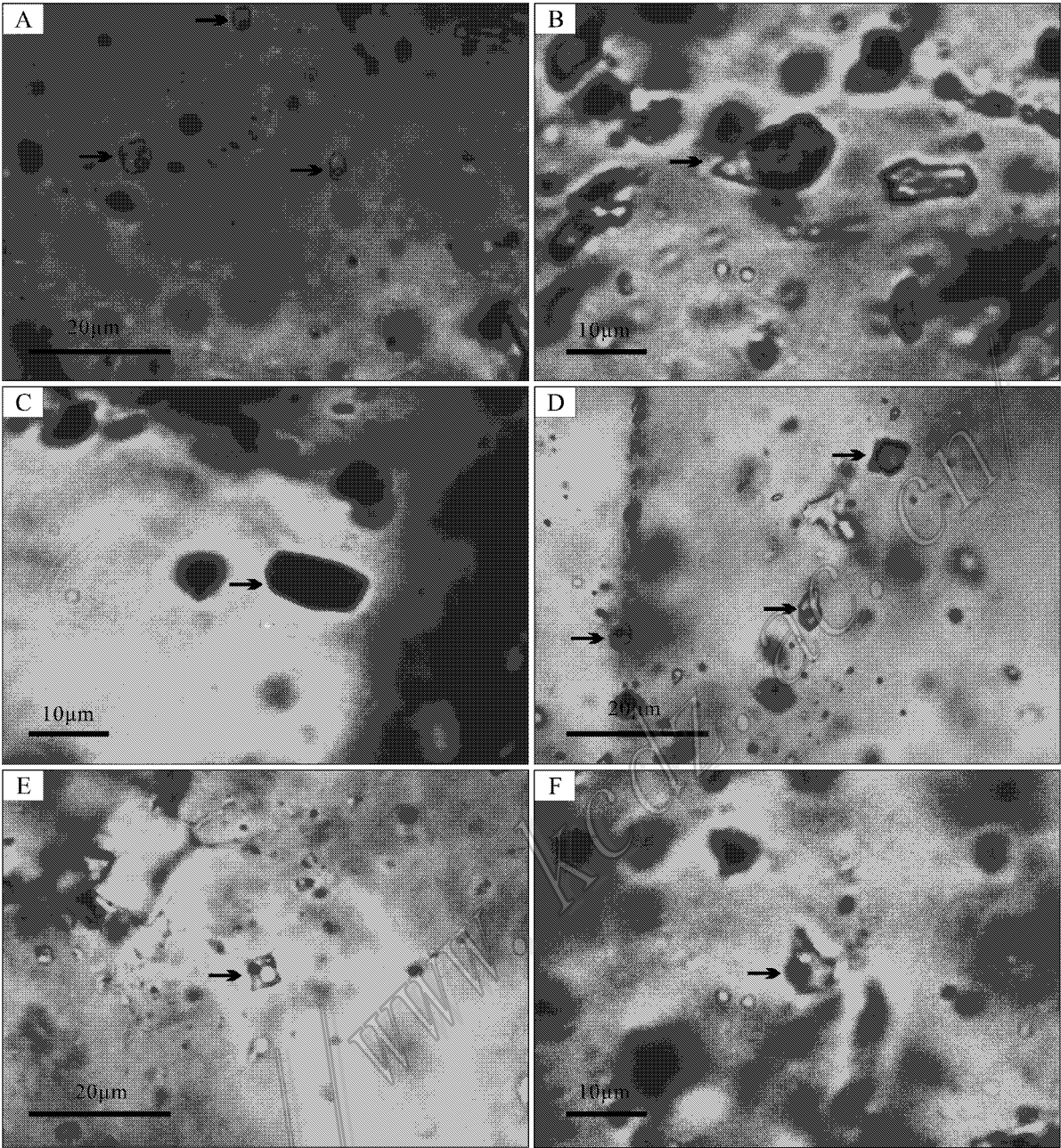


图 5 百炉沟铅锌矿床矿石中石英及闪锌矿内流体包裹体在室温下的岩相学特征  
A. 石英中的液体包裹体(样品 07-45) ; B. 石英中气体充填度 >50% 的液体包裹体(样品 07-47) ; C. 石英中的纯气体包裹体(样品 07-47) ;  
D. 石英中不同气体充填度的气体包裹体与液体包裹体共存(样品 07-45) ; E. 石英中的含石盐子晶包裹体(样品 07-45) ;  
F. 闪锌矿中的含石盐子晶包裹体(样品 07-48)

Fig. 5 Photomicrographs of fluid inclusion types in quartz and sphalerite from Bailugou Pb-Zn deposit.  
A. Liquid-rich inclusions in quartz (sample 07-45) ; B. Gas-rich two-phase inclusions in quartz (sample 07-47) ; C. Pure gas inclusions in quartz (sample 07-47) ; D. Coexistence of liquid-rich inclusions and gas-rich two-phase inclusions (sample 07-45) ; E. Halite-bearing three-phase inclusions in quartz (sample 07-45) ; F. Halite-bearing three-phase inclusions in sphalerite (sample 07-48)

(Bischoff, 1991) (图 8A) 或  $t-w(\text{NaCl}_{\text{eq}})-\rho$  相图 (Bodnar, 1993) (图 8B) 得到的密度范围(0.73~0.95  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 基本一致。应用 Haas (1976) 推导的计算  $\text{NaCl}$  水溶液包裹体均一压力的公式 (详见刘斌等, 1999), 求得各样品形成时的压力。由于均一温度范围较大, 因而, 压力的变化范围亦较大 (表 2 和图



表 2 百炉沟铅锌矿床内气液两相流体包裹体测温数据

Table 2 Microthermometric data of vapor-liquid fluid inclusions in Bailugou Pb-Zn deposit

| 样品号   | 主矿物 | 气相分数/%  | 均一温度/℃          |       | 冰点/℃           |      | $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$ |      | 密度/ $\text{g}/\text{cm}^3$ |      | 压力/MPa       |       |
|-------|-----|---------|-----------------|-------|----------------|------|---------------------------------|------|----------------------------|------|--------------|-------|
|       |     |         | 范围(个数)          | 平均    | 范围(个数)         | 平均   | 范围                              | 平均   | 范围                         | 平均   | 范围           | 平均    |
| 07-45 | 石英  | 5~20    | 240.9~307.2(24) | 276.9 | -6.1~-2.9(8)   | -4.6 | 4.8~9.3                         | 7.2  | 0.76~0.86                  | 0.82 | 32.66~91.20  | 61.39 |
| 07-46 | 石英  | 5~10    | 188.9~315.6(18) | 248.0 | -6.4~-2.4(15)  | -3.9 | 4.0~9.7                         | 6.2  | 0.77~0.93                  | 0.85 | 11.73~100.67 | 41.41 |
| 07-47 | 石英  | 5~10    | 222~308(15)     | 260.1 | -5.4~-4.6(10)  | -5.0 | 7.3~8.4                         | 7.8  | 0.77~0.90                  | 0.85 | 22.81~91.42  | 46.84 |
| 07-48 | 闪锌矿 | 5~20    | 197~353(18)     | 260.7 | -10.1~-4.3(14) | -8.2 | 6.9~14                          | 11.8 | 0.79~0.94                  | 0.88 | 13.74~153.41 | 60.30 |
| 07-49 | 石英  | 5~20,70 | 180~327(19)     | 255.1 | -4.5~-2.5(9)   | -3.5 | 4.2~7.2                         | 5.7  | 0.74~0.92                  | 0.83 | 9.77~117.85  | 51.34 |

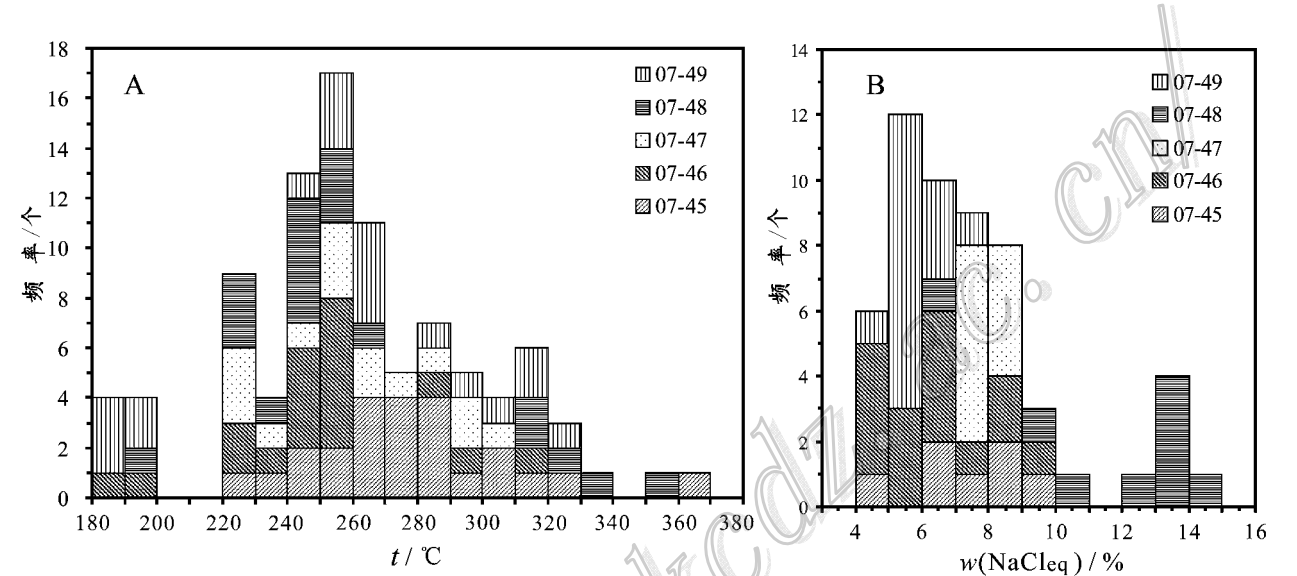


图 6 百炉沟铅锌矿床中石英和闪锌矿内流体包裹体的均一温度(A)和盐度(B)直方图

Fig. 6 Histogram showing homogenization temperature (A) and salinity (B) of fluid inclusions in quartz and sphalerite from Bailugou Pb-Zn deposit

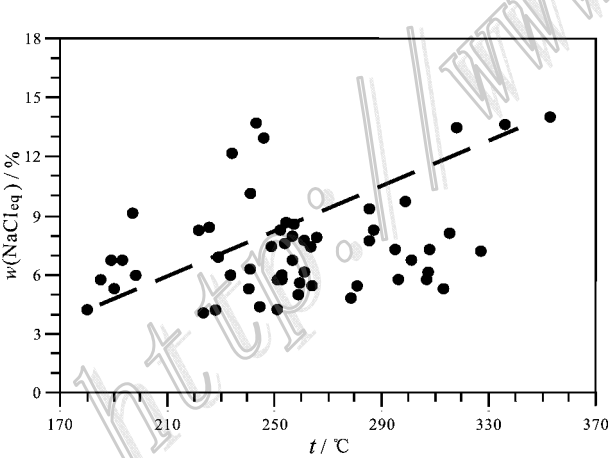


图 7 百炉沟铅锌矿床内流体包裹体的均一温度及盐度散点图

Fig. 7 Homogenization temperature versus salinity diagram of fluid inclusions from Bailugou Pb-Zn deposit

8A)。选取均一温度峰值(250~260℃)所对应的压力(38.94~44.87 MPa),根据成矿深度经验公式: $H = p \times 1/27(\text{km})$ ,求得所对应的深度范围为 1.44~1.66 km,说明百炉沟铅锌矿床的成矿深度较浅。

3.4 单个流体包裹体的激光拉曼分析

此次工作对部分流体包裹体的气相成分进行了激光拉曼分析(图 9)。分析结果表明,流体包裹体的气相成分较复杂,可分为 2 种情况:①气液两相包裹体和含子矿物三相包裹体的气相成分主要为  $\text{H}_2\text{O}$  蒸汽(图 9A);②纯气体包裹体中出现  $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等气体。纯气体包裹体的气相成分可分为 3 种组合: $\text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$  组合(图 9B)、 $\text{N}_2 + \text{CO}_2$  组合(图 9C)、 $\text{N}_2 + \text{CH}_4$  组合(图 9D),以第一种组合为主。纯气体包裹体内普遍出现  $\text{CH}_4$ ,表明成矿流体为还原性流体。

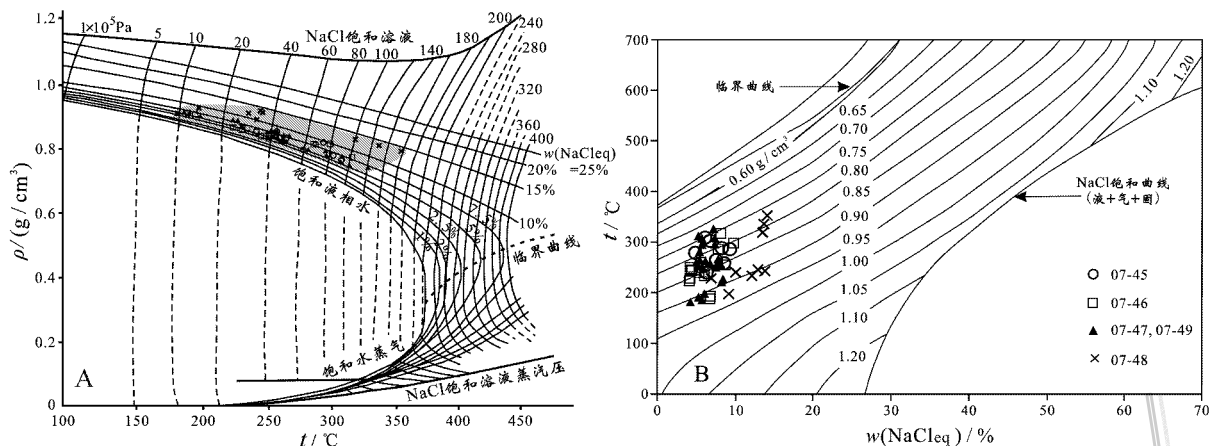


图 8 百炉沟铅锌矿床内富液体流体包裹体 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的  $t$ - $\rho$  (A) 和  $t$ - $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ - $\rho$  (B) 相图  
底图转引自卢焕章等,2004 阴影区为百炉沟矿床内流体包裹体均一温度及盐度投影区

Fig. 8 Phase diagram of  $t$ - $\rho$  (A) and  $t$ - $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ - $\rho$  (B) for NaCl-H<sub>2</sub>O system of liquid-rich fluid inclusions from Bailugou Pb-Zn deposit

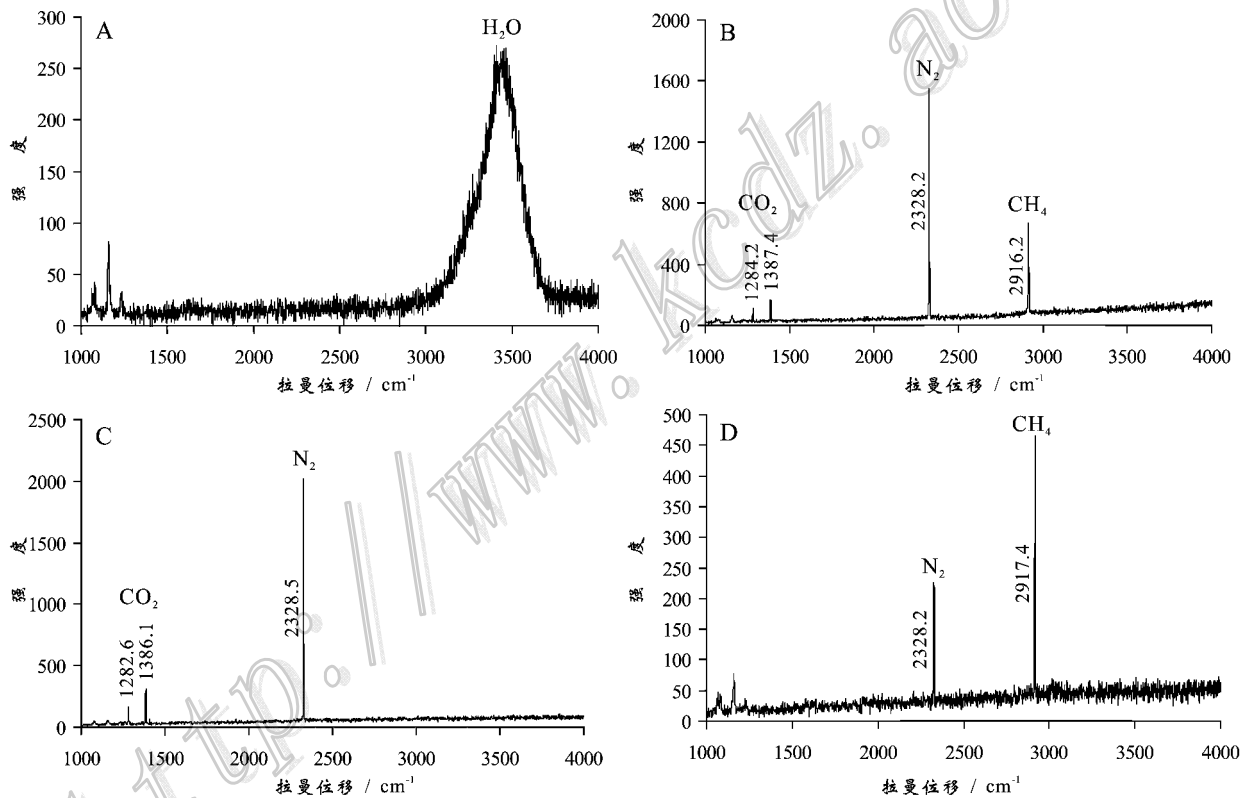


图 9 百炉沟铅锌矿床内石英中流体包裹体的激光拉曼谱图

A. 富液体两相包裹体和含子矿物三相包裹体的气相成分,主要为 H<sub>2</sub>O; B、C 和 D. 纯气体包裹体的气相成分: B. N<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> 组合; C. N<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> 组合; D. N<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> 组合

Fig. 9 Laser Raman spectrograms of fluid inclusions in quartz from Bailugou Pb-Zn deposit

A. Gas-phase composition of liquid-rich two-phase inclusions and halite-bearing three-phase inclusions (mainly H<sub>2</sub>O vapor); B, C and D. Gas-phase composition of pure gas inclusions: B. N<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>; C. N<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>; D. N<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>

3.5 流体包裹体的成矿学意义

流体包裹体岩相学观察显示,在了一期矿物中,原生流体包裹体出现富液体两相包裹体、富气体两相包裹体、纯气体包裹体、含子矿物三相包裹体共生组合,分布邻近,富液体两相包裹体和含子矿物三相包裹体均一到液相,富气体两相包裹体均一到气相,它们的均一温度相近,揭示出在成矿过程中可能存在流体沸腾作用。激光拉曼分析表明,百炉沟矿床内流体包裹体的气相成分出现纯 H<sub>2</sub>O 蒸汽、N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> 等至少 4 种组合,很可能也是发生沸腾作用的一种标志。引起流体沸腾的常见机制有减压及不同温度流体的混合(卢焕章等,2004),现在还无法确定引起百炉沟矿床流体沸腾的具体机制。但该矿床内角砾状矿石较为发育(图 4B 和 4C),指示出成矿时伴随有断裂活动,因而,减压很可能是引起沸腾的宏观地质因素。由测温结果以及与均一温度峰值所对应的压力可见,百炉沟铅锌矿床是浅成、中温、中-低盐度的热液矿床。

4 H、C、O、S、Pb 同位素组成

4.1 样品及分析方法

用于稳定同位素组成分析的样品直接采自地下坑道,颇为新鲜。矿石样品呈条带状、角砾状构造,中-粗粒结构,其中的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、方解石及少量绢云母等。将样品破碎至 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、石英、方解石等,纯度达 99% 以上。

石英的 H、O 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。石英 H 同位素组成分析的对象是石英内捕获的

流体包裹体。将挑选出的石英单矿物样品进行低温烘烤,以去除矿物表面的吸附水;然后,用爆裂法释放出流体包裹体中的水,用锌还原成 H<sub>2</sub>;最后,在 Finnigan MAT-251 质谱仪上分析其 H 同位素组成。石英 O 同位素分析采用 Clayton 等(1963)所叙述的 BrF<sub>5</sub> 法来分离 CO<sub>2</sub>;将所得之气体在 Finnigan MAT-251 质谱仪上分析其 O 同位素组成。分析结果见表 3。

方解石的 C、O 同位素组成分析在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 100% 磷酸法完成。将方解石粉碎至 200 目,低温(100~120℃)烘干,然后放入容器,注入 100% 纯磷酸,在 50℃ 真空条件下反应 24 小时,将所得之 CO<sub>2</sub> 气体经简单提纯后,在 isoPrime 同位素质谱仪上进行测试。经质量分馏校正后,数据以 PDB 标准给出。 $\delta^{18}\text{O}$  值用 Friedman 等(1977)给出的平衡方程, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 1.03086\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} + 30.86$ ,换算为 SMOW 标准。所得结果见表 3。

硫化物矿物的 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 SO<sub>2</sub> 法。先用直接氧化法将矿物中的硫转化成 SO<sub>2</sub>,然后,进入 Finnigan MAT-251 同位素质谱仪进行测试,分析结果采用国际标准 CDT 表达,分析精度优于  $\pm 0.2\text{‰}$ 。分析结果见表 4。Pb 同位素测试所用仪器为 Nu Instrument HR,采用 NBS 981 标准重复测试结果( $\pm 2\sigma$ ): $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2.1674 \pm 0.0040$ , $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.9148 \pm 0.0018$ , $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.9402 \pm 0.0070$ , $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.4966 \pm 0.0030$ , $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.7155 \pm 0.0120$ 。分析结果见表 5,该表内同时列出了该区元古界以及与斑岩钼矿化相关的燕山期岩体的前人研究资料。

表 3 百炉沟铅锌矿床中石英及方解石的氢、氧、碳同位素组成  
Table 3  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , and  $\delta^{13}\text{C}$  values for quartz and calcite from Bailugou Pb-Zn deposit

| 样品号    | 采样位置    | 矿物  | $\delta\text{D}/\text{‰}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$ | $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$ | $t/^\circ\text{C}$ | 资料来源     |
|--------|---------|-----|---------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|----------|
| 07-45  | S150 矿体 | 石英  | -89                       | 17.90                                          |                                               | 10.13                                               | 276.9              | 本文       |
| 07-46  | S150 矿体 | 石英  | -76                       | 17.20                                          |                                               | 8.16                                                | 248.0              |          |
| 07-48  | S150 矿体 | 方解石 |                           | 15.56                                          | -0.44                                         | 8.70                                                | 260.7              |          |
| 07-49  | S150 矿体 | 方解石 |                           | 16.12                                          | 1.26                                          | 9.05                                                | 255.1              |          |
| 07-54  | S116 矿体 | 石英  | -89                       | 16.50                                          |                                               | 8.01                                                | 260.0              |          |
| 07-59  | S116 矿体 | 石英  | -82                       | 20.00                                          |                                               | 10.96                                               | 248.0              |          |
| S150-5 | S150 矿体 | 石英  | -90                       | 14.90                                          |                                               | 6.41                                                | 260.0              |          |
| Sjd-22 | S171 矿体 | 方解石 | -83                       | 9.40                                           | 1.80                                          | 2.51                                                | 260.0              | 燕长海,2004 |

表 4 百炉沟铅锌矿床内硫化物的硫同位素数据  
Table 4  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfide minerals from Bailugou  
Pn-Zn deposit

| 样品号        | 采样位置    | 矿物  | $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$ | 资料来源     |
|------------|---------|-----|-----------------------------------------------|----------|
| 07-52      | S116 矿体 | 方铅矿 | 0.6                                           | 本文       |
| 07-55      | S116 矿体 | 方铅矿 | 0.6                                           |          |
| 07-54      | S116 矿体 | 闪锌矿 | 1.8                                           |          |
| 07-56      | S116 矿体 | 闪锌矿 | 2.0                                           |          |
| 07-53      | S116 矿体 | 黄铁矿 | 1.7                                           |          |
| 07-54      | S116 矿体 | 黄铁矿 | 2.7                                           |          |
| 07-43      | S150 矿体 | 闪锌矿 | 5.1                                           |          |
| 07-43      | S150 矿体 | 黄铁矿 | 8.4                                           |          |
| S040-2     | S040 矿体 | 方铅矿 | 1.5                                           |          |
| S040-3     | S040 矿体 | 方铅矿 | 1.5                                           |          |
| SXW-22     | S040 矿体 | 闪锌矿 | 3.7                                           | 燕长海,2004 |
| S116-22    | S116 矿体 | 黄铁矿 | 1.3                                           |          |
| S150-4     | S150 矿体 | 方铅矿 | -1.2                                          |          |
| S150-3     | S150 矿体 | 闪锌矿 | 9.6                                           |          |
| S150-1     | S150 矿体 | 黄铁矿 | 10.9                                          |          |
| Sjd-23     | S171 矿体 | 黄铁矿 | 1.3                                           |          |
| CMI5001-K4 | S150 矿体 | 黄铁矿 | 9.2                                           | 刘国印,2007 |

4.2 H、O 同位素组成的成矿学意义

直接测试了 4 件脉石石英中流体包裹体的  $\delta\text{D}$  值  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值则由石英和方解石的  $\delta^{18}\text{O}$  值根据氧同位素平衡分馏方程： $10^3\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 2.90$  (200 ~ 500℃，转引自郑永飞等, 2000) 和  $10^3\ln\alpha_{\text{方解石-水}} = 2.78 \times 10^6/T^2 - 2.89$  (200 ~ 700℃，转引自郑永飞等, 2000) 计算获得。对于 07-45、07-46、07-48、07-49 等 4 件样品，采用包裹体均一温度平均值；对于 07-54、S150-5、Sjd-22 这 3 件样品，则采用前文流体包裹体均一温度峰值 260℃；07-59 和 07-46 号样品均采自矿体顶部，且其矿物组合一致，故采用 07-46 号样品的均一温度平均值。样品 07-54 代表了石英-方解石-闪锌矿-方铅矿阶段，而样品 S150-5、Sjd-22 可能属于该阶段或更晚阶段(石英-方解石阶段)，样品 07-59 则代表了石英-黄铁矿阶段。

由表 3 可见，石英和方解石内流体包裹体的水具有相似的  $\delta\text{D}$  值，其变化范围为 -76‰ ~ -90‰，计算所得之包裹体水的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  变化范围为 2.51‰ ~ 10.96‰。代表石英-黄铁矿阶段的样品，其  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值(8.16‰ ~ 10.96‰) 高于代表石英-方解石-闪锌矿-方铅矿阶段之样品的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值(2.51‰ ~ 9.05‰)。在自然界不同性质水的  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  图解内，百炉沟铅锌矿床有一个样品投落在岩浆水范围内，其余样品则

投落在岩浆水范围下端附近(图 10)，反映其成矿流体可能主要来源于岩浆水。样品 S150-5、Sjd-22 的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值较小(2.51‰ ~ 6.41‰)，可能反映出晚阶段有地下水的加入。同时也可见，该成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}$  值较高。

4.3 C、O 同位素组成的成矿学意义

百炉沟矿床中的 3 件方解石样品具有相似的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  值，为 -0.44‰ ~ 1.80‰，平均 0.87‰； $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  值为 9.40‰ ~ 16.12‰，平均 13.69‰(表 3 和图 11)。该矿床的围岩为元古界碳酸盐岩。据刘孝善等(1987)和祁进平等(2005)研究，该区官道口群和栾川群 5 件碳酸盐岩样品的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  值为 -2.8‰ ~ 2‰，平均 -0.34‰， $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  值为 15.70‰ ~ 19.30‰，平均 17.57‰，代表地层的 C、O 同位素组成。徐兆文等(1995)和刘孝善等(1987)研究表明，该区燕山期三道庄斑岩-矽卡岩型钼(钨)矿床中 11 件岩浆热液脉状方解石样品的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  值为 -8.55‰ ~ -1.91‰，平均 -6.49‰， $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  值为 9.09‰ ~ 15.53‰，平均 12.58‰。

百炉沟矿床中方解石的 C 同位素组成与该区元古界碳酸盐岩相近，而其 O 同位素组成则与该区矽卡岩矿床中的热液方解石相近(图 11)。与自然界碳来源相比，百炉沟矿床中方解石的 C 同位素组成接近沉积碳酸盐的碳同位素组成，而氧同位素值则明显降低(图 11)。这些可能反映出在岩浆热液作用下，地层中的碳被活化而形成方解石等碳酸盐矿物。

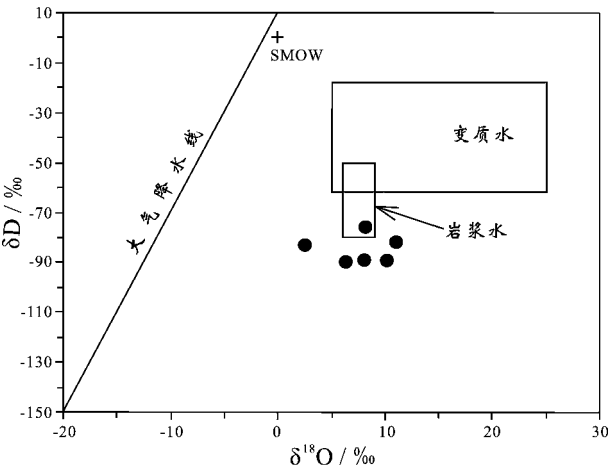


图 10 百炉沟铅锌矿床成矿流体  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  图解

Fig. 10 Plot of  $\delta^{18}\text{O}$  versus  $\delta\text{D}$  values of ore-forming fluid in Bailugou Pb-Zn deposit



表 5 百炉沟矿床、栾川群和官道口群地层、南泥湖岩体的铅同位素组成

| Table 5 Pb isotope composition of minerals and whole rock samples from Bailugou deposit, Lunchuan Group and Guandaokou Group strata, and Nannihu porphyry |             |     |                                   |                                   |                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|
|                                                                                                                                                           | 样品号         | 矿物  | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 资料来源      |
| 百炉沟矿床                                                                                                                                                     | CM15001-K4  | 黄铁矿 | 18.273                            | 15.5                              | 39.344                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | S150-1      | 黄铁矿 | 18.286                            | 15.575                            | 39.529                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | S150-3      | 闪锌矿 | 17.632                            | 15.461                            | 38.358                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | S150-4      | 方铅矿 | 18.426                            | 15.549                            | 39.637                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | S040-2      | 闪锌矿 | 17.606                            | 15.52                             | 38.496                            | 燕长海,2004  |
|                                                                                                                                                           | S040-3      | 闪锌矿 | 17.552                            | 15.451                            | 38.264                            | 燕长海,2004  |
|                                                                                                                                                           | 07-43       | 方铅矿 | 18.259                            | 15.579                            | 39.558                            | 本文        |
|                                                                                                                                                           | 07-53       | 方铅矿 | 17.718                            | 15.532                            | 38.968                            | 本文        |
|                                                                                                                                                           | 07-56       | 方铅矿 | 17.725                            | 15.531                            | 38.990                            | 本文        |
|                                                                                                                                                           | B11         | 方铅矿 | 18.218                            | 15.526                            | 39.264                            | 祁进平,2006  |
|                                                                                                                                                           | B12         | 闪锌矿 | 17.609                            | 15.466                            | 38.325                            | 祁进平,2006  |
|                                                                                                                                                           | B13         | 闪锌矿 | 17.608                            | 15.465                            | 38.323                            | 祁进平,2006  |
| 栾川群                                                                                                                                                       | 200416      | 全岩  | 18.215                            | 15.648                            | 38.35                             | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | 200418      | 全岩  | 19.249                            | 15.684                            | 41.104                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | 200421      | 全岩  | 17.998                            | 15.56                             | 38.979                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | 200438      | 全岩  | 18.217                            | 15.635                            | 38.598                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | S139-3      | 全岩  | 17.694                            | 15.525                            | 38.692                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | 200439      | 全岩  | 18.868                            | 15.685                            | 38.303                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | Y02         | 全岩  | 17.735                            | 15.468                            | 38.631                            | 祁进平,2006  |
|                                                                                                                                                           | Y03         | 全岩  | 18.071                            | 15.482                            | 38.905                            | 祁进平,2006  |
|                                                                                                                                                           | Y21         | 全岩  | 17.736                            | 15.478                            | 38.463                            | 祁进平,2006  |
|                                                                                                                                                           | Y22         | 全岩  | 17.742                            | 15.467                            | 38.493                            | 祁进平,2006  |
| 官道口群                                                                                                                                                      | 20043b      | 全岩  | 18.103                            | 15.634                            | 38.316                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | S116-1      | 全岩  | 18.738                            | 15.672                            | 39.094                            | 刘国印,2007  |
|                                                                                                                                                           | B3          | 全岩  | 17.937                            | 15.498                            | 38.84                             | 祁进平,2006  |
|                                                                                                                                                           | B26         | 全岩  | 18.296                            | 15.508                            | 39.272                            | 祁进平,2006  |
|                                                                                                                                                           | B27         | 全岩  | 18.086                            | 15.501                            | 38.667                            | 祁进平,2006  |
|                                                                                                                                                           | B28         | 全岩  | 18.443                            | 15.505                            | 39.179                            | 祁进平,2006  |
|                                                                                                                                                           | B29         | 全岩  | 18.326                            | 15.506                            | 39.043                            | 祁进平,2006  |
| 南泥湖岩体                                                                                                                                                     | ZK705       | 钾长石 | 17.189                            | 15.381                            | 37.655                            | 罗铭玖等,1991 |
|                                                                                                                                                           | $\gamma$ -1 | 钾长石 | 17.499                            | 15.427                            | 37.843                            | 罗铭玖等,1991 |
|                                                                                                                                                           | DF-2        | 方铅矿 | 17.45                             | 15.54                             | 39.01                             | 罗铭玖等,1991 |
|                                                                                                                                                           | N-013       | 黄铁矿 | 17.605                            | 15.421                            | 37.71                             | 罗铭玖等,1991 |
|                                                                                                                                                           | DF-2        | 方铅矿 | 17.45                             | 15.54                             | 39.01                             | 张本仁等,1987 |
|                                                                                                                                                           | J-5         | 钾长石 | 17.806                            | 15.569                            | 38.508                            | 张本仁等,1987 |
|                                                                                                                                                           | J-4         | 钾长石 | 17.894                            | 15.482                            | 38.093                            | 张本仁等,1987 |

注：祁进平(2006)的数据转引自刘国印,2007。

4.4 硫化物 S 同位素组成的成矿学意义

表 4 和图 12 显示出：①百炉沟矿床 17 件硫化物样品的  $\delta^{34}\text{S}$  值为  $-1.2\text{‰} \sim 10.9\text{‰}$ ，平均为  $3.57\text{‰}$ ，而且，除了都存在一个主峰值外，还有少部分硫化物样品的  $\delta^{34}\text{S}$  值具有增高的特点，指示出硫化物中的硫除某种主要来源外，还有其他来源；②不同矿体内硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  存在一定的差别，表现为 S150 矿体内硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值稍高于其他几个矿体，而后的数据则相近；③统计表明，所有矿体内硫化物硫同位素的总体特征是  $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} >$

$\delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ ，但个别样品中也见  $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}}$  的情况，这表明矿石中主要硫化物之间，尤其是闪锌矿与方铅矿之间，硫同位素分馏基本达到平衡，而黄铁矿与其他硫化物的硫同位素分馏则尚未完全达到平衡。这已被显微镜下观察到方铅矿与闪锌矿共生以及两者交代黄铁矿的现象所证实。

闪锌矿的硫同位素可近似代表热液系统的总硫(Ohmoto et al., 1979)，因为，在  $200 \sim 600\text{℃}$  温度范围内，闪锌矿与热液系统中  $\text{H}_2\text{S}$  的硫同位素分馏值很小( $0.13\text{‰} \sim 0.45\text{‰}$ )。百炉沟矿床内闪锌矿的  $\delta^{34}\text{S}$

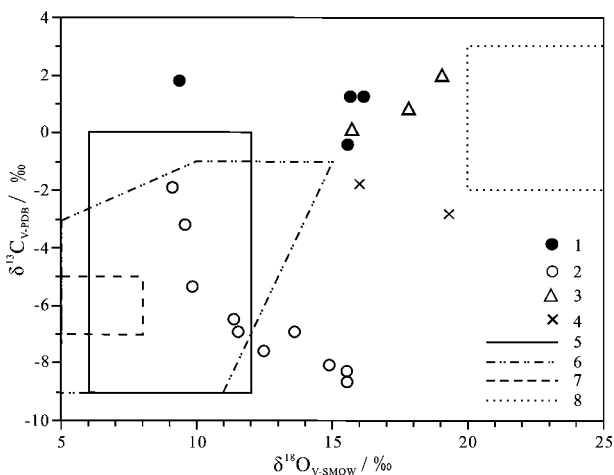


图 11 百炉沟铅锌矿床、三道庄斑岩钼矿床及地层中方解石的  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  图解

栾川群和官道口群的数据引自祁进平等(2005)及刘孝善等(1987);三道庄斑岩钼矿床的数据引自刘孝善等(1987)及徐兆文等(1995);底图据刘建明等(2003a, 2003b)

1—百炉沟铅锌矿床;2—三道庄斑岩钼矿床;3—栾川群;4—官道口群;5—花岗岩;6—原生碳酸盐;7—地幔;8—沉积碳酸盐

Fig. 11  $\delta^{18}\text{O}$  versus  $\delta^{13}\text{C}$  of calcites from Bailugou Pb-Zn deposit, Sandaozhuang porphyry Mo deposit, Luanchuan Group and Guandaokou Group strata

1—Bailugou Pb-Zn deposit; 2—Sandaozhuang porphyry-type Mo deposit; 3—Luanchuan Group; 4—Guandaokou Group; 5—Granite;

6—Primary carbonate; 7—Mantle; 8—Sedimentary carbonate

值为  $1.80\text{‰} \sim 9.60\text{‰}$  (表 4), 反映出铅锌成矿热液系统的  $\delta^{34}\text{S}$  在成矿过程中有一定的变化; 其硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  峰值集中在  $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$  及其附近, 具有深部来源硫的特点。结合 C、O 同位素研究, 表明其具有岩浆热液及地层 2 个物质来源, 具体说, 即为该区的燕山期侵入岩和地层这 2 种可能的物质来源。

罗铭玖等(1991)和周作侠等(1993)的研究表明: 在栾川地区, 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-矽卡岩型钼矿床, 其中硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值呈典型的塔式分布, 峰值集中在  $2\text{‰} \sim 4\text{‰}$  (图 12) 这 3 个矿床具有大致相同的深源硫特点, 被解释为来自基底, 伴随燕山期岩浆作用到达成矿部位; 在这 3 个矿床中, 磁黄铁矿常见(磁黄铁矿与热液系统中  $\text{H}_2\text{S}$  的硫同位素分馏值亦很小), 其成矿热液系统的  $\delta^{34}\text{S}$  值集中在  $1.24\text{‰} \sim 3.30\text{‰}$  之间。罗铭玖等(1991)报道, 官道口群白术沟组碳质千枚岩中 2 件结核状黄铁矿样品的  $\delta^{34}\text{S}$  值分别为  $12.43\text{‰}$  和  $18.63\text{‰}$ ; 周作侠等(1993)曾报道, 栾川群

煤窑沟组石煤层中 7 件浸染状立方体自形晶黄铁矿样品的  $\delta^{34}\text{S}$  值为  $-12.4\text{‰} \sim 10.5\text{‰}$ , 并且, 分别集中在  $-13\text{‰} \sim -8\text{‰}$  和  $6 \sim 11\text{‰}$  两个区间, 没有近零值的数据(图 12)。由此可见, 栾川地区元古界中硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值, 或者是较大的负值, 或者为较大的正值, 前者反映出有机还原硫酸盐的硫同位素特点(郑永飞等, 2000), 而后者则反映出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(Ohmoto et al., 1990)。栾川地区元古界中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值大体为  $6\text{‰} \sim 19\text{‰}$  (图 12), 这与前寒武纪膏岩地层中硫酸盐的  $\delta^{34}\text{S}$  值 ( $16\text{‰} \sim 17\text{‰}$ ; 郑永飞等, 2000) 相当。该地区的深部岩浆及地层构成了硫化物成矿中硫的 2 种主要来源。百炉沟矿床中硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值集中在  $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$  及其附近, 其硫同位素组成的主体与南泥湖-三道庄、上房沟和马圈等矿床中硫化物的相应值相近(图 12), 在很大程度上反映出硫化物中的硫主要来自深部岩浆, 其成矿与构造岩浆活动相关的热液作用关系密切。但是, 百炉沟矿床中硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值具有离开该区深部岩浆来源硫 ( $\delta^{34}\text{S}$  值集中在  $2\text{‰} \sim 4\text{‰}$ ) 向负值或正值增大方向漂移的趋势(图 12), 这在很大程度上反映出有少量地层来源硫的加入。

#### 4.5 Pb 同位素组成的成矿学意义

由表 5 可见: 百炉沟矿床内硫化物的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.552 \sim 18.426$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.451 \sim 15.579$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.264 \sim 39.637$ , 不同硫化物矿物之间无明显差别; 与南泥湖钼矿化相关的岩体中钾长石、黄铁矿及方铅矿的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.189 \sim 17.894$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.381 \sim 15.569$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.655 \sim 39.01$ 。栾川群和官道口群的岩石与南泥湖岩体相比, 更富含放射性成因铅, 其全岩  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.694 \sim 19.249$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.467 \sim 15.685$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.303 \sim 41.104$ 。栾川地区元古界岩石的铅同位素组成明显不同于与钼矿化相关的燕山期岩体, 在  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解中, 它们具有 A、B 两个不同的分布区域(图 13)。百炉沟矿床内硫化物的铅同位素组成处于 A 与 B 两个区域之间(图 13), 反映其成矿金属元素或来自燕山期岩浆并受到地层铅的混染, 或来自燕山期岩浆热液及元古界地层两个方面。考虑到百炉沟铅锌矿床与该矿集区内燕山期斑岩型钼矿床的密切的空间关系, 笔者更倾向于前一种可能。

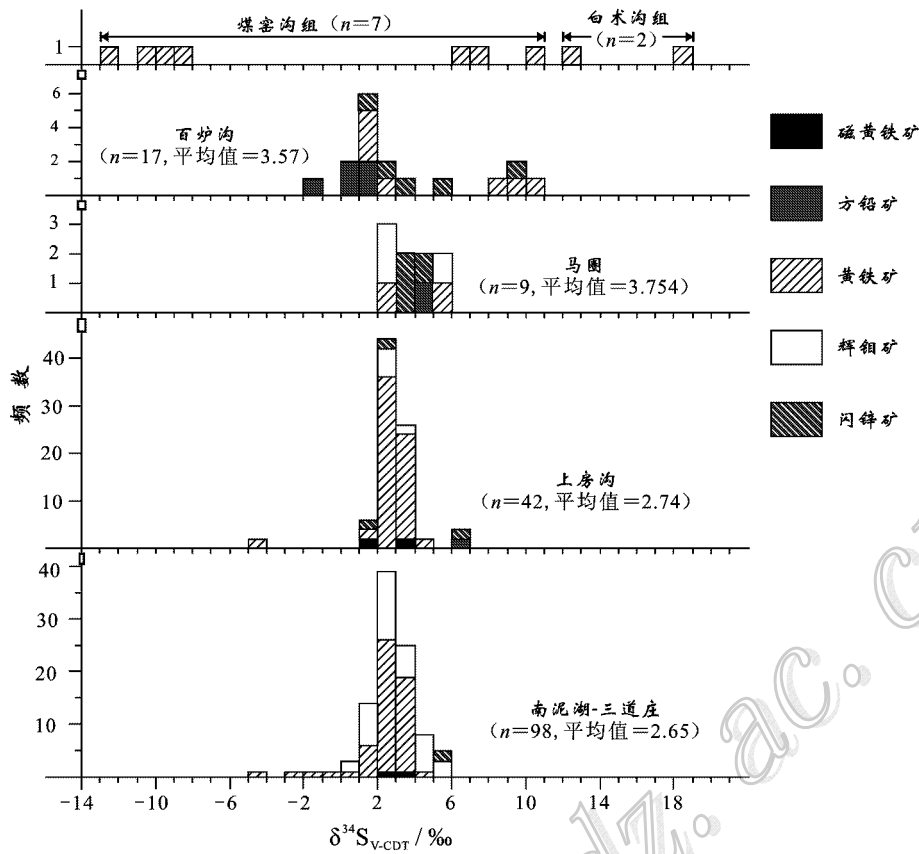


图 12 百炉沟铅锌矿床、栾川地区斑岩-矽卡岩型钼矿床及元古界内硫化物的硫同位素直方图  
南泥湖-三道庄、上房沟和马圈钼矿床的硫同位素数据引自罗铭玖等(1991)和周作侠等(1993)；  
地层的硫同位素数据引自罗铭玖等(1991)；*n* 为样品个数

Fig. 12  $\delta^{34}\text{S}$  histogram of ore and diagenetic minerals from Bailugou Pb-Zn deposit, porphyry-skarn type Mo deposits and Proterozoic strata

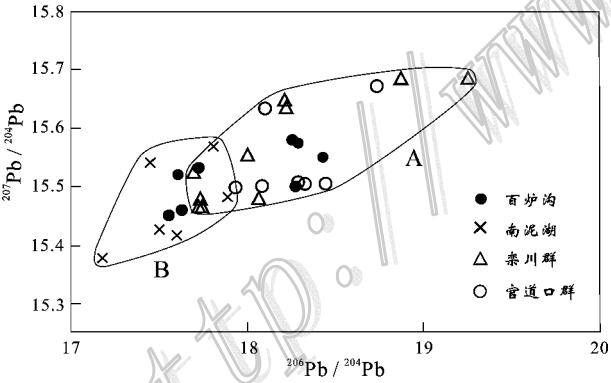


图 13 百炉沟铅锌矿床铅同位素组成及其与南泥湖  
岩体和元古界地层的对比

A—元古界地层岩石铅；B—与斑岩型钼矿床相关的  
燕山期岩体的铅同位素组成

Fig. 13  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  of minerals and  
whole rocks samples from Bailugou Pb-Zn deposit, Nannihu  
porphyry and Proterozoic strata

A—Rock lead of Proterozoic strata ; B—Lead isotopic composition of  
Yanshanian intrusions related to porphyry-type Mo deposits

## 5 结 论

河南栾川地区的百炉沟铅锌矿床位于豫西南牛  
心斜穹状背斜之西侧,与该地区的南泥湖、三道庄、  
上房沟、马圈等斑岩型和斑岩-矽卡岩型钼矿床相毗  
邻。该矿床内的矿体受中元古界变质碳酸盐岩-碎  
屑岩层间 NW 向断裂带的控制,呈脉状、板状,闪锌  
矿、方铅矿、黄铁矿、石英及方解石是其稳定的矿物  
组合。

该矿床中石英和闪锌矿内捕获的原生流体包裹  
体,可分为富液体气液两相包裹体、富气体气液两相  
包裹体、纯气体包裹体、含子矿物三相包裹体等 4 种  
类型。这些流体包裹体的气相成分至少有纯  $\text{H}_2\text{O}$   
蒸汽、 $\text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2 + \text{CH}_4$  等 4 种组  
合。成矿过程中不同性质流体的混合及流体沸腾等  
特征颇为明显。石英和闪锌矿内原生流体包裹体的

均一温度以中温(250~260℃)为主,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 较低(以5.0%~9.0%为主),成矿深度为1.44~1.66 km。总之,百炉沟矿床的成矿流体具有浅成、中温、低盐度的特征。

该矿床成矿流体的 $\delta\text{D}_{\text{水}}(\text{V-SMOW}) = -76\text{‰} \sim -90\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}(\text{V-SMOW}) = 2.51\text{‰} \sim 10.96\text{‰}$ ,表明成矿流体的主体为岩浆热液。矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 峰值为1‰~2‰,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.552 \sim 18.426$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.451 \sim 15.579$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.264 \sim 39.637$ ,表明其成矿物质的岩浆来源特征明显。

综上所述,河南栾川地区的百炉沟铅锌矿床应属受层间构造控制的中温岩浆热液充填-交代矿床。

志 谢 本研究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,在此表示诚挚感谢!

## References

- Bao Z W, Wang Q, Zi F, Tang G J, Du F J and Bai G D. 2009. Geochemistry of the Paleoproterozoic Longwangzhuang A-type granites on the southern margin of North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Geochimica*, 38(6): 509-522 (in Chinese with English abstract).
- Bischoff J L. 1991. Densities of liquids and vapors in boiling  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  solutions: A PVTX summary from 300°C to 500°C [J]. *American Journal of Science*, 289: 217-248.
- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depressin of  $\text{H}_2\text{O-NaCl}$  solutions [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57(3): 683-684.
- Clayton R N and Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 27: 43-52.
- Duan S G, Xue C J, Yan C H, Liu G Y, Song Y W and Zhang D H. 2008. Comparison of Pb-Zn metallogenic characteristics between northern and southern margins of North China Landmass [J]. *Mineral Deposits*, 27(3): 383-398 (in Chinese with English abstract).
- Friedman I, O'Neil J R and Fleischer M. 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest [R]. US Geological Survey Professional Paper.
- Haas J L. 1976. Physical properties of the coexisting phases and thermodynamic properties of the  $\text{H}_2\text{O}$  component in boiling  $\text{NaCl}$  solutions [J]. *U.S. Geol. Survey Bull.*, 1421-1473.
- Li X Z, Yan Z, Lu X X, et al. 1993. Granitoids of mountain Qinling-Dabieshan [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 20, 169-173 (in Chinese).
- Liu B and Shen K. 1999. Thermodynamics of fluid inclusions [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 118p (in Chinese).
- I. iu G Y. 2007. The Pb-Zn-Ag metallogeny and prospecting target in the south marge of North China Craton (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Xao R G. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Ye J, Xu J H, Sun J G and Shen K. 2003a. C-O and Sr-Nd isotopic geochemistry of carbonate minerals from gold deposits in East Shandong, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 775-784 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhang H F, Sun J G and Ye J. 2003b. Geochemical research on C-O and Sr-Nd isotopes of mantle-derived rocks from Shandong Province, China [J]. *Science in China (Series D)*, 33(10): 921-930 (in Chinese).
- Liu X S, Wu C Y and Huang B. 1987. Origin and evolution of the hydrothermal system in Nannihu-Sandaozhuang molybdenum (tungsten) ore deposit, Luanchuan county, Henan Province [J]. *Geochimica*, (3): 199-207 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Fan H W, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W H. 2004. Fluid inclusion [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Lü W D and Sun W Z. 2004. Metallogenic condition of lead and zinc deposit in Lushi-Luanchuan terrain [J]. *Mineral Resources and Geology*, 18(6): 507-516 (in Chinese with English abstract).
- Lü W D, Zhao C H, Sun W Z and Yan J S. 2005. Characters of the skarn Pb-Zn deposit in Luanchuan County, Henan Province [J]. *Geological Survey and Research*, 28(1): 25-31 (in Chinese with English abstract).
- Luo M J, Zhang F M, Dong Q Y, et al. 1991. Molybdenum deposits in China [M]. Zhengzhou: Henan Science Technology Press. 108-132, 400-413 (in Chinese).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotope of sulfur and carbon [A]. In: Barnes R D, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposit* (2nd Edition) [M]. New York: John Wiley and Sons. 509-567.
- Ohmoto H, Kaiser C J and Geer K A. 1990. Systematics of sulphur isotopes in recent marine sediments and ancient sediment-hosted base metal deposits [A]. In: Herbert H K and Ho S E, eds. *Stable isotopes and fluid processes in mineralization* [M]. *Geol. Dep. Univ. Extens., Univ. of Western Australia*, 23: 70-120.
- Qi J P, Zhang J and Tang G J. 2005. Carbon and oxygen isotope composition of the Meso-Neoproterozoic strata, south of the Xiong'er terrane: Evidence of the CMF model [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1365-1372 (in Chinese with English abstract).
- Wang C M, Zhang S T, Deng J, Sun Y X, Yan C H and Ye H S. 2007. Geological-geochemical features and genesis of Lengshuibegou Pb-Zn deposit in Henan [J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 175-183 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z W, Ren Q J and Qiu J S. 1995. A comparative investigation of

- ore-bearing skarns in Sandaozhuang and Huangbeiling, Luanchuan County, Henan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(1):88-96 (in Chinese with English abstract).
- Yan C H. 2004. Study on inner structure of lead-zinc-silver mineralization system in Eastern Qinling [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 72p (in Chinese with English abstract).
- Yan C H, Song Y W, Liu G Y and Xing K. 2004. Geological features of Yangshuwa-Bailugou MVT Lead-zinc deposit belt in Luanchuan, Henan Province[J]. *Geological Survey and Research*, 27(4):249-254 (in Chinese with English abstract).
- Yan C H, Zhao R J, Zheng H X and Zhang M Y. 2005. Geochemical characteristics of lead-zinc-silver bearing sedimentary formations in southwestern Henan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 29(5):393-396 (in Chinese with English abstract).
- Yang R Y, Xu Z W and Ren Q J. 1997. Ages and magma sources of Shibaogou and Huoshenmiao complexes in east Qinling[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 16(1):15-18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B R, Li Z J, Luo T C and Gu X M. 1987. Regional geochemical study of Lushi-Lingbao district, western Henan[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 185p (in Chinese).
- Zheng Y F and Chen J F. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 247p (in Chinese).
- Zhou Z X, Li B L, Guo K H, et al. 1993. Genesis of the gold (molybdenum) deposits in southern margin of the Northern China Platform [M]. Beijing: Seismological Press. 143-147 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 包志伟,王强,资锋,唐功建,杜凤军,白国典. 2009. 龙王幢A型花岗岩地球化学特征及其地球动力学意义[J]. *地球化学*, 38(6):509-522.
- 段士刚,薛春纪,燕长海,刘国印,宋要武,张德会. 2008. 华北陆块南、北边缘铅锌成矿特征对比[J]. *矿床地质*, 27(3):383-398.
- 李先梓,严阵,卢欣祥,等. 1993. 秦岭大别山花岗岩[M]. 北京:地质出版社. 20,169-173.
- 刘斌,沈昆. 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京:地质出版社. 118页.
- 刘国印. 2007. 华北陆块南缘铅锌银成矿规律及找矿方向研究(博士学位论文)[D]. 导师:肖荣阁. 北京:中国地质大学.
- 刘建明,叶杰,徐九华,孙景贵,沈昆. 2003a. 胶东金矿床碳酸盐矿物的碳-氧和铍-铍同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 19(4):775-784.
- 刘建明,张宏福,孙景贵,叶杰. 2003b. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和铍-铍同位素地球化学研究[J]. *中国科学(D辑)*, 33(10):921-930.
- 刘孝善,吴澄宇,黄标. 1987. 河南栾川南泥湖-三道庄钼(钨)矿床热液系统的成因与演化[J]. *地球化学*, (3):199-207.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,欧光习,沈昆,张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社.
- 吕文德,孙卫志. 2004. 卢氏-栾川地体铅锌矿成矿地质条件分析及找矿远景[J]. *矿产与地质*, 18(6):507-516.
- 吕文德,赵春和,孙卫志,燕建设. 2005. 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*, 28(1):25-31.
- 罗铭玖,张辅民,董群英,等. 1991. 中国钼矿床[M]. 郑州:河南科学技术出版社. 108-132,400-413.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,李晓峰,王义天,张长青,李永峰. 2005. 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*, 21(1):169-188.
- 祁进平,张静,唐国军. 2005. 熊耳地体南侧中晚元古代地层碳氧同位素组成CMF模式的证据[J]. *岩石学报*, 21(5):1365-1372.
- 王长明,张寿庭,邓军,孙艳霞,燕长海,叶会寿. 2007. 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*, 26(4):175-183.
- 徐兆文,任启江,邱检生. 1995. 河南省栾川三道庄和黄背岭矿区含矽卡岩的对比研究[J]. *矿物学报*, 15(1):88-96.
- 燕长海. 2004. 东秦岭铅锌银成矿系统内部结构[M]. 北京:地质出版社. 72页.
- 燕长海,宋要武,刘国印,邢矿. 2004. 河南栾川杨树凹-百炉沟MVT铅锌矿带地质特征[J]. *地质调查与研究*, 27(4):249-254.
- 燕长海,赵荣军,郑红星,张明云. 2005. 豫西南地区铅锌银沉积建造地球化学特征[J]. *物探与化探*, 29(5):393-396.
- 杨荣勇,徐兆文,任启江. 1997. 东秦岭地区石宝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*, 16(1):15-18.
- 张本仁,李泽九,骆庭川,谷晓明. 1987. 豫西卢氏-灵宝地区区域地球化学研究[M]. 北京:地质出版社. 185页.
- 郑永飞,陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社. 247页.
- 周作侠,李秉伦,郭抗衡,等. 1993. 华北地台南缘金(钼)矿床成因[M]. 北京:地震出版社. 143-147.