

引用格式：王晓虎，郭涛，李效壮，等，2022. 南秦岭烂木沟金矿床地球化学特征与矿床成因研究 [J]. 地质力学学报，28（3）：464–479. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021002

Citation: WANG X H, GUO T, LI X Z, et al., 2022. A study on the geochemical characteristics and metallogenesis of the Lanmugou gold deposit in the South Qinling Belt, Shaanxi, China [J]. Journal of Geomechanics, 28（3）：464–479. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021002

南秦岭烂木沟金矿床地球化学特征与矿床成因研究

王晓虎^{1,2}，郭涛¹，李效壮^{1,2}，廖华¹，张文高^{1,2}，赵新科³，贾凤仪³，曹林杰³

WANG Xiaohu^{1,2}，GUO Tao¹，LI Xiaozhuang^{1,2}，LIAO Hua¹，ZHANG Wengao^{1,2}，ZHAO Xinke³，JIA Fengyi³，CAO Linjie³

- 1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
- 2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室，北京 100081；
- 3. 陕西地矿第一地质队有限公司，陕西 安康 725099

- 1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
- 2. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
- 3. *Shaanxi Geology and Mining First Geological Team Co. Ltd, Ankang 725099, Shaanxi, China*

A study on the geochemical characteristics and metallogenesis of the Lanmugou gold deposit in the South Qinling Belt, Shaanxi, China

Abstract: The Lanmugou gold deposit is located in Xunyang County, Shaanxi Province, produced in the Indosinian Shiquan-Shenhe thrust nappe of the South Qinling, and controlled by the Heihumiao brittle-ductile shear zone. In this paper, via the analysis of the mineralization background, ore-controlling structure features and geochemical characteristics of the deposit, the preliminary conclusions on the geological characteristics and metallogenesis of the Lanmugou gold deposit have been obtained. Co content of pyrite in strata varies from 67.6×10^{-6} to 208×10^{-6} , Ni content from 108×10^{-6} to 585×10^{-6} , and the total amount of rare earth elements from 2.16×10^{-6} to 22.9×10^{-6} . Simultaneously, Co content in hydrothermal pyrite varies from 317×10^{-6} to 751×10^{-6} , Ni content from 82.8×10^{-6} to 304×10^{-6} , and the total amount of rare earth elements from 4.04×10^{-6} to 51.74×10^{-6} . $\delta^{34}\text{S}$ value in hydrothermal pyrite ranges from 9.9‰ to 12.1‰, with the average value of 11.27‰. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ value of hydrothermal pyrite ranges from 18.560 to 20.206, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ value from 15.668 to 15.708, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ value from 38.257 to 38.860; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ value of pyrite in the strata ranges from 18.502 to 20.086, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ value from 15.644 to 15.788 and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ value from 38.475 to 38.907. $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ value of quartz in ore ranges from 13.5‰ to 15.9‰, with the average value of 14.7‰, and the $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ value ranges from -77.8‰ to -71.3‰, with the average value of -74.55‰. Re-Os isochron age of pyrite in the ore is 202 ± 12 Ma. From the comprehensive studies, it is concluded that the source of ore-forming materials of the Lanmugou gold deposit is from the interlayer of volcanic rocks in strata, and the ore-forming fluids are multiple-sourced (basically metamorphic water derived from interlayer water, atmospheric precipitation). The inference of metallogenesis is that the ore-forming hydrothermal fluids filled the lamellae of brittle-ductile shear zone and the minerals were precipitated and enriched in the extension stage after the collision of the Qinling orogenic belt at the end of the late Triassic-early

基金项目：国家重点研发计划（2021YFC2901805）；中国地质调查局地质调查项目（12120114014201）

This research is financially supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFC2901805) and the Geological Survey Project of China Geological Survey (Grant No. 12120114014201)

第一作者简介：王晓虎（1983—），男，博士，副研究员，主要从事构造与成矿研究。E-mail: wangzyke@yeah.net

通讯作者：郭涛（1972—），男，博士，副研究员，主要从事矿田构造研究。E-mail: gtaot@sohu.com

收稿日期：2021-01-06；修回日期：2022-05-01；责任编辑：吴芳

Jurassic. The metallogenic characteristics show that the Lanmugou deposit is an orogenic gold deposit.

Key words: South Qinling; Lanmugou; gold deposit; geologic characteristics; metallogenesis

摘 要: 烂木沟金矿位于陕西省旬阳县境内，产于南秦岭石泉-神河构造岩片中，受黑虎庙脆-韧性剪切带控制。文章通过烂木沟金矿区域成矿背景、地质特征及矿床地球化学分析，初步探讨了烂木沟金矿床成因。烂木沟地区地层中黄铁矿微量元素 Co 含量为 $67.60 \times 10^{-6} \sim 208.00 \times 10^{-6}$ ，Ni 含量 $108.00 \times 10^{-6} \sim 585.00 \times 10^{-6}$ ，稀土元素总量 $2.16 \times 10^{-6} \sim 22.90 \times 10^{-6}$ ，矿石黄铁矿中 Co 含量为 $317.00 \times 10^{-6} \sim 751.00 \times 10^{-6}$ ，Ni 含量 $82.80 \times 10^{-6} \sim 304.00 \times 10^{-6}$ ，稀土元素总量 $4.04 \times 10^{-6} \sim 51.74 \times 10^{-6}$ ，矿石黄铁矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $9.9\text{‰} \sim 12.9\text{‰}$ ，均值 11.27‰ ，矿石黄铁矿中铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $18.560 \sim 20.206$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $15.668 \sim 15.708$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $38.257 \sim 38.860$ ，地层黄铁矿中铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $18.502 \sim 20.086$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $15.644 \sim 15.788$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $38.475 \sim 38.907$ ，矿石中石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $13.5\text{‰} \sim 15.9\text{‰}$ ，均值为 14.7‰ ， $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-77.8\text{‰} \sim -71.3\text{‰}$ ，均值为 -74.55‰ ，矿石中黄铁矿 Re-Os 等时线年龄 $202 \pm 12 \text{ Ma}$ 。结论认为烂木沟金矿成矿物质来源于地层中火山岩夹层，成矿流体为多来源，主体为建造水改造后的变质水。烂木沟金矿形成于晚三叠世末期—早侏罗世早期秦岭造山带碰撞后的伸展阶段，成矿流体充填于脆-韧性剪切带片理中，矿物沉淀富集，为造山型金矿。

关键词: 南秦岭；烂木沟；金矿；地质特征；矿床成因

中图分类号: P611; P59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 03-0464-16

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021002

0 引言

秦岭造山带是中国重要的地理及地质分界，是华北板块和扬子板块之间的汇聚带，也是一个巨型多金属成矿带。张国伟等（1995a，1995b，1997）将秦岭造山带划分为华北板块南缘、秦岭微板块和扬子板块北缘三大陆壳单元，研究区南秦岭构造带属于秦岭微板块，北以商丹缝合带为界，南至勉略缝合带（图 1）。近年来，在陕西省安康市北部石泉、汉阴和旬阳一带古生代地层中，发现了金矿床（点）60 余处，西起石泉县羊坪湾，东至旬阳市烂木沟，显现出一条具有巨大潜力的金成矿带。不少学者通过该金成矿带及其西段羊坪湾、黄龙、长沟、鹿鸣等矿床研究认为金矿体赋存于下志留统梅子垭组，梅子垭组为金的矿源层提供了成矿的物质基础，成矿流体多来源，中低温成矿（李会民，1997；王民良，2007；李福让等，2009；杨龙伟等，2018），成矿受安康北部脆-韧性剪切带控制，剪切带是金矿形成的导矿、运矿、容矿构造，带内的 S2 面理与金富集成矿密切相关（冯明伸和杨建东，1994；王民良，2007；张康，2012；樊培贺，2015；韩珂等，2015，2017，2018；杨宏宇等，2015；高雅宁等，2016；杨兴科等，2016；贾凤仪等，2016；张康等，

2020）。已有的研究主要在矿带的西段，而且对矿床成因主要有两种不同视角的认识，一种强调沉积-改造作用，认为成矿物质来自原始矿源层，后期经历了花岗斑岩脉改造或变质作用改造成矿（李会民，1997；李福让等，2009；王瑞廷等，2013）；另一种强调不同尺度构造变形对成矿的控制作用，认为后期成矿热液充填于韧性剪切带 S2 面理叠加富集成矿（杨兴科等，2016；韩珂等，2018）。作为一条延伸上百千米的成矿带，矿带东段的研究仅阐述了烂木沟矿区地质特征、控矿条件及控矿因素、找矿方向等（焦金荣，2013；沙亚洲等，2013；王鹏等，2018）。矿带东段的成矿作用特征以及矿带东、西段成矿作用有何异同等尚未得到揭示。由此，文章通过烂木沟金矿床地质特征和地球化学特征分析，并对比矿带西段矿床的地球化学特征，探讨南秦岭构造带烂木沟金矿床成因，提出矿床成因类型，为矿带找矿预测提供参考。

1 区域地质概况

南秦岭构造带，夹持在商丹和勉略缝合带之间，构造带内发育的礼县-山阳断裂、镇安-板岩镇断裂、舟曲-江口断裂、迭部-武都断裂、公馆-十堰断裂等，构成了区内构造的基本格架（张国伟

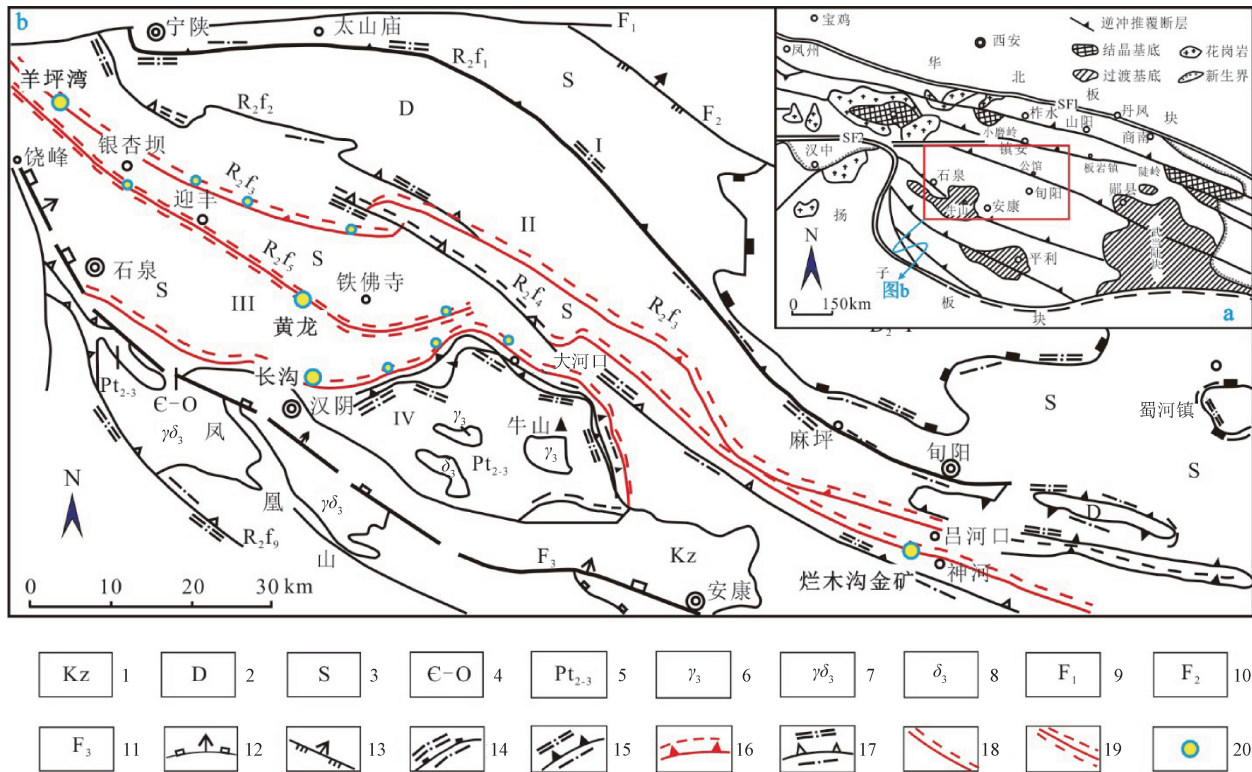


图1 南秦岭石泉—旬阳一带地质构造略图 (据冯明仲和杨建东, 1994; 张国伟等, 2001; 杨兴科等, 2016; 韩珂等, 2020 修改)

Fig. 1 Geologic sketch of the Shiquan-Xunyang area in the South Qinling Belt (modified from Feng and Yang, 1994; Zhang et al., 2001; Yang et al., 2016; Han et al., 2020)

1-Cainozoic; 2-Devonian; 3-Silurian; 4-Cambrian-Ordovician; 5-Meso-Neoproterozoic (Wudang group and Yaolinghe group); 6-Granite; 7-Granodiorite; 8-Diorite; 9-Ningshan fault; 10-Shuanghe-Baihe fault (Nanyangshan fault); 11-Shiquan-Ankang (Yuehe) fault; 12-Brittle strike-slip normal fault; 13-Brittle high-angle normal fault; 14-Ductile denudation fault; 15-Early ductile nappe fault; 16-Ductile detachment fault; 17-Late ductile nappe fault; 18-Ductile inclined layer; 19-Ductile shear zone; 20-Gold deposits (occurrences); I-Taishanmiao-Maping nappe sheet; II-Yinxingba-Lvhe nappe sheet; III-Shiquan-Shenhe sliding nappe sheet; IV-Niushan-Fenghuangshan basement rock; SF1-Shangdan suture zone; SF2-Mianlv suture zone

等, 2001; 图 1)。早古生代伸展裂陷阶段, 勉略洋打开, 南秦岭从扬子板块裂解 (Dong and Santosh, 2016), 晚古生代为稳定台盆—台地沉积阶段 (刘宝珺和徐效松, 1994; 徐通, 2016), 中生代沿勉略带进入俯冲—碰撞阶段, 勉略带内黑沟峡变质双峰式火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 242 ± 21 Ma, 代表火山岩的变质年龄, 指示俯冲碰撞的时间为早—中三叠世 (李曙光等, 1996; 徐通, 2016; Dong and Santosh, 2016); 在晚三叠世, 随着勉略洋的闭合, 进入碰撞造山后调整阶段。由于造山隆升, 深部构造热衰减, 勉略带内发生晚造山期伸展垮塌作用, 形成勉县、青峰等一系

列伸展断陷盆地, 同时沿勉略缝合带南侧发育巨大碰撞挤压、向外的逆冲推覆构造和前陆冲断褶皱, 产生了前陆断褶带前缘的前陆盆地 (T_3-J_{1-2}), 标志板块俯冲碰撞造山过程到了最后完成阶段, 晚侏罗世进入陆内造山构造演化阶段 (张国伟等, 2019)。

南秦岭构造带地质构造复杂, 断裂构造多期次叠加。局部地区见前震旦或老的基底岩系, 盖层主要包括震旦系陆缘裂谷沉积—火山沉积岩系、下古生界寒武系—奥陶系—志留系和上古生界泥盆系—石炭系—二叠系, 部分地区有至下三叠统的连续沉积, 整体属陆缘海—边缘海沉积环境, 其

上即为陆相沉积地层(张国伟等,2001)。

石泉-旬阳金矿化带位于南秦岭构造带的中部,扬子板块北缘巴山弧形构造带东侧,呈北西—南东向展布,出露基底地层由中元古代耀岭河群、郧西群的火山岩系组成,盖层由寒武系—志留系的碎屑-化学沉积岩系组成,地层普遍遭受变质作用,以中低绿片岩相为主(图1)。

矿带整体位于石泉-神河推覆构造带中(冯明伸和杨建东,1994;杨兴科等,2016;图1a),矿带已探明数处规模不等的金矿床或矿化点。其中,较大的矿床有长沟、羊坪湾、黄龙、金斗坡、八庙沟、石板沟、鹿鸣等,金矿主要赋存在区内广泛出露的早古生代地层中。烂木沟矿床即产于该矿带的东段(图1b)。

2 矿床地质特征

矿区及外围地层主要呈北西西向展布,出露有泥盆系大枫沟组(D_2d)、志留系梅子垭组(S_1m)、志留系大贵坪组(S_1d)以及奥陶系二道桥组(O_{er})。二道桥组由黑云母石英片岩、碳酸盐岩、炭硅质岩、酸性-基性变质火山岩等组成,底部往往为含炭石英岩、炭质千枚岩、炭质片岩或灰白色石英岩,其上与大贵坪组整合接触。大贵坪组由黑色含炭石英岩、炭质片岩、含炭千枚岩夹少量细晶白云岩或细晶灰岩透镜体组成,与上覆梅子垭组整合接触。梅子垭组由二云石英片岩、含石榴石千枚岩夹变质粉砂岩、深灰色绢云千枚岩,含炭千枚岩夹石英砂岩、变质细砂-粉砂岩、细晶灰岩组成,与上覆大枫沟组断层接触或被其超覆。大枫沟组由陆源碎屑岩、泥质岩和碳酸盐岩组成。

区域性的断裂和褶皱构造展布方向总体上与地层一致,断裂倾向北,倾角为 $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$,局部发育闪长玢岩脉(图2a)。矿区范围内断裂和褶皱构造发育。断裂走向北西西,倾向北北东,倾角一般是 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。矿区间褶皱较为发育,轴面北北东倾和南倾均有,倾角为 65° 左右。黑虎庙脆-韧性剪切带为主要控矿构造,剪切带长约9.6 km,宽度30~80 m,总体走向北西西,倾向北北东,倾角约 70° (图3)。从剪切带向两侧,岩石变形变质逐渐减弱,说明应变集中且强烈的区域有利成矿。剪切带沿走向呈舒缓波状,在烂木沟以东逐渐收

缩变窄呈线状(图2b)。黑虎庙剪切带不仅在空间上控制着矿化蚀变带的展布,而且还控制着围岩蚀变的空间分带。矿区岩石普遍经历了区域动力变质作用,剪切带内多见片岩,石英定向拉长,黄铁矿呈条带状分布,平行于片理产状。

矿区范围内未见岩浆岩出露,区域上仅出露少量闪长玢岩脉(图2)。

矿区内矿体主要有3条,分别为I、II、III号矿体,产于剪切带内的蚀变黑云母石英片岩或石英黑云母片岩中,矿体总体呈南东东—北西西向展布,呈层状、似层状产出,具膨胀收缩、分枝复合现象。矿体产状与地层产状基本一致,一般走向 $90^{\circ}\sim 110^{\circ}$,倾向北北东,倾角 $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。矿体平均厚度0.94~2.9 m,矿床Au平均品位2.48 g/t(图4)。

矿石构造有片状构造、带状构造和浸染状构造,结构主要有变晶结构、交代结构和粒状结构。矿石矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、钛铁矿、闪锌矿、方铅矿等,脉石矿物主要有黑云母、石英、绿泥石、钠长石、方解石等。金以自然金和粒间金形式存在,石英是金的主要载体矿物,分布于石英的粒间,或包裹于石英中或分布于岩石裂隙及空隙中。与金矿成矿有关的蚀变矿物有黑云母、绿帘石、硬绿泥石、石榴子石、阳起石、透闪石、矽线石等。

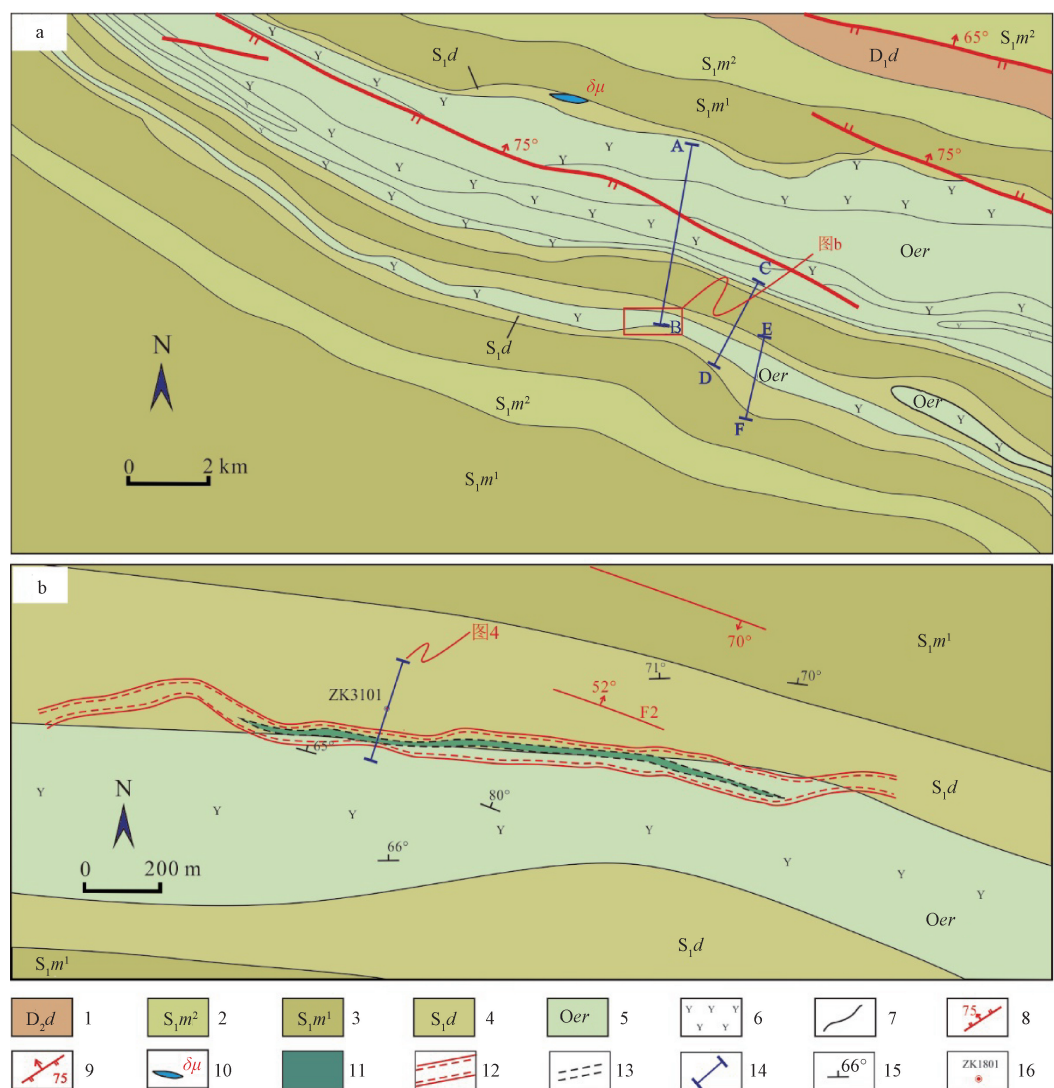
3 矿床地球化学特征

3.1 采样地点及测试方法

样品采自烂木沟矿区烂木沟剖面、庙沟剖面,研究过程中对矿石黄铁矿和地层中的黄铁矿进行了识别(图5),并在挑样过程进行区别。采样位置见图3。

将野外采集的岩(矿)石样品送至河北廊坊中铁物探勘查有限公司挑选单矿物,单矿物纯度可达99%以上。单矿物微量稀土元素分析在国家地质实验测试中心完成,采用等离子质谱仪(PE300D)进行测试,检测的方法和依据为DZ/T0223-2001。

氢、氧、硫、铅同位素测试均由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。用于分析测试氢氧同位素的石英样品主要采自矿区围岩中的石英脉。测试前先要清洗样品、去吸附水和次生



1—泥盆系大枫沟组；2—志留系梅子垭组上段；3—志留系梅子垭组下段；4—志留系大贵坪组；5—奥陶系二道桥组；6—火山岩；7—地层界线；8—正断层及其产状；9—逆断层及其产状；10—闪长玢岩脉；11—含炭云母石英片岩；12—脆-韧性剪切带；13—金矿化带；14—剖面线；15—片理产状；16—钻孔位置及编号

a—烂木沟金矿邻区地质图；b—烂木沟金矿区地质图

图 2 烂木沟金矿地质图 (据杨增济等, 1990 修改)

Fig. 2 Geologic map of the Lanmugou gold deposit (modified from Yang et al. , 1990)

(a) Geologic map of adjacent areas; (b) Geologic map of the mining area

1-The Dafenggou Formation; 2-Upper member of the Meiziya Formation; 3-Lower member of the Meiziya Formation; 4-The Daping Formation; 5-The Erdaoqiao Formation; 6-Volcanics; 7-Stratigraphic boundary; 8-Normal faults and their occurrence; 9-Reverse faults and their occurrence; 10-Diorite porphyrite dikes; 11-Carbonaceous mica quartz schist; 12-Brittle-ductile shear zone; 13-Gold mineralized belt; 14-Section line; 15-Foliation occurrence; 16-Boreholes and their numbers

包体。氢同位素分析采用爆裂法从样品中提取原生流体包裹体中的水，然后用锌置换水中的氢并送至质谱仪分析测试，精度为 $\pm 2\text{‰}$ ；氧同位素分析采用 BrF_5 法，精度 $\pm 0.2\text{‰}$ 。所用仪器为 MAT-253 EM 型质谱仪，以 V-SMOW 为标准。硫同位素分析中，将硫化物样品以氧化亚铜作氧化剂制备测试样品，分析检测方法和依据为 DZ/T0184. 14-

1997《硫化物中硫同位素组成的测定》，仪器型号为 Delta v plus 质谱仪，采用 V-CDT 国际标准，分析精度 $\pm 0.2\text{‰}$ 。铅同位素测试用 ISOPROBE-T 型号热表面电离质谱仪分析，检测方法和依据为 DZ/T0184. 12-1997《岩石、矿物中微量铅的同位素组成的测定》，精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

Re-Os 同位素测年在国家地质实验测试中心完

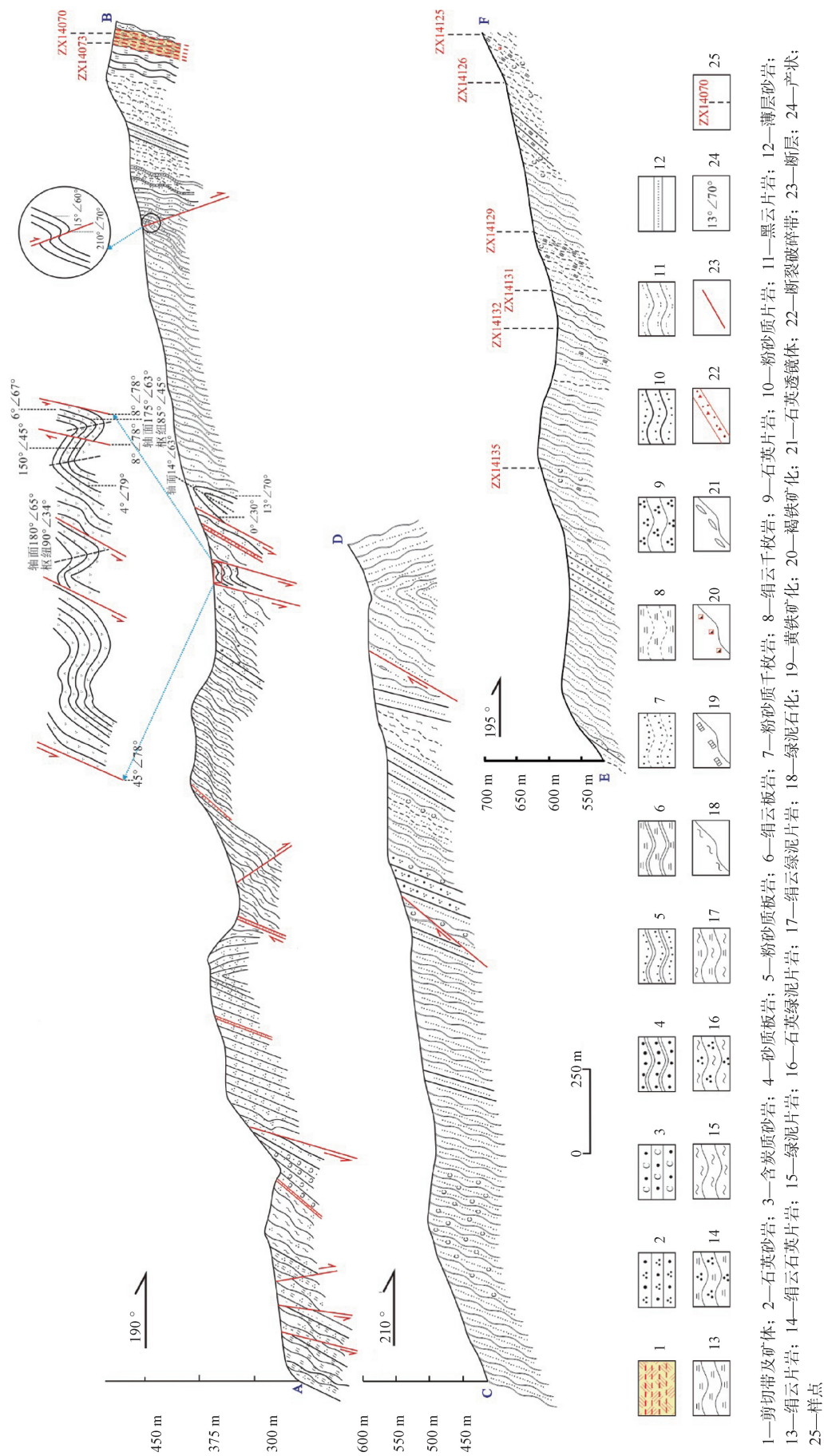


图3 旬阳县烂木沟实测构造剖面图 (剖面位置见图2)

Fig. 3 Structural profile of the Lanmugou mining area in Xunyang County (The location is shown in Fig. 2)

1—剪切带及矿体; 2—石英砂岩; 3—含炭质砂岩; 4—砂质板岩; 5—粉砂质板岩; 6—绢云板岩; 7—粉砂质千枚岩; 8—绢云千枚岩; 9—石英片岩; 10—粉砂质片岩; 11—黑云片岩; 12—薄层砂岩; 13—绢云片岩; 14—绢云石英片岩; 15—绿泥片岩; 16—石英绿泥片岩; 17—绢云绿泥片岩; 18—绿泥片岩; 19—黄铁矿化; 20—黄铁矿化; 21—石英英透闪体; 22—断裂破碎带; 23—断层; 24—产状; 25—样点

图3 旬阳县烂木沟实测构造剖面图 (剖面位置见图2)

Fig. 3 Structural profile of the Lanmugou mining area in Xunyang County (The location is shown in Fig. 2)

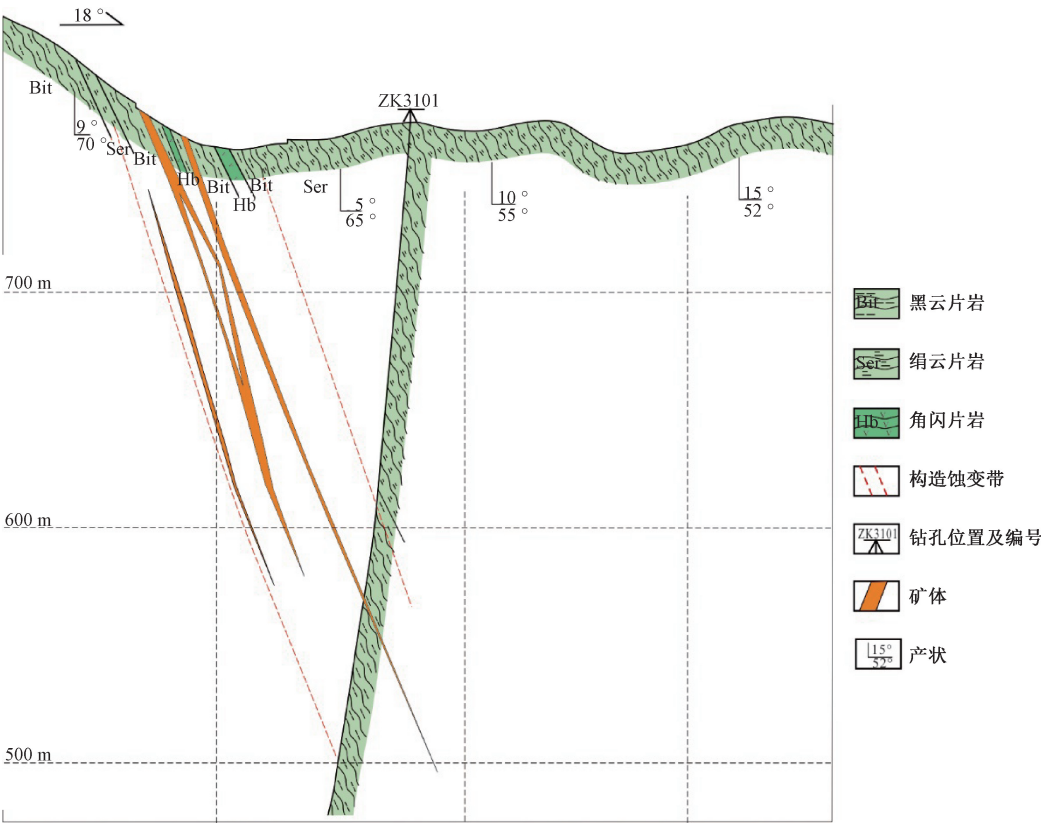


图 4 烂木沟金矿 31 号勘探线剖面图
Fig. 4 Profile of No. 31 exploration line in the Lanmugou gold deposit



图 5 烂木沟矿区地层中黄铁矿及矿石中黄铁矿和石英
Fig. 5 Pyrite and quartz in the ores and pyrites from the strata in the Lanmugou mining area

成, 测试用的是 TJA X-series 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS), 分析测试方法详见相关文献杜安道等 (1994, 2001)。

3.2 矿物稀土、微量元素地球化学特征

此次测试黄铁矿样品稀土、微量元素含量及比值如表 1 所示。从表 1 可知, 地层中黄铁矿

ΣREE 含量低, 为 $2.16\times10^{-6}\sim22.90\times10^{-6}$, 矿石中黄铁矿 ΣREE 高于地层中黄铁矿, 为 $4.04\times10^{-6}\sim51.74\times10^{-6}$ 。地层样品中黄铁矿 $w(\text{Co})$ 较低, 在 $67.60\times10^{-6}\sim208.00\times10^{-6}$, 波动较大, $w(\text{Ni})$ 略高于 $w(\text{Co})$, 为 $108.00\times10^{-6}\sim585.00\times10^{-6}$ 。

表 1 烂木沟金矿岩 (矿) 石黄铁矿微量、稀土元素含量及特征值 ($W_B/\times10^{-6}$)

Table 1 Contents and characteristic values of the trace and rare earth elements of pyrite in the rocks (ores) from the Lanmugou gold deposit ($W_B/\times10^{-6}$)

样号	地层中黄铁矿						矿石中黄铁矿					
	ZX14125-1	ZX14125-2	ZX14126-2	ZX14129-1	ZX14131-1	ZX14132-1	ZX14073-1	ZX14073-2	ZX14073-3	ZX14073-6	ZX14070-11	ZX14070-12
Co	208.00	73.10	206.00	67.60	112.00	201.00	526.00	389.00	751.00	317.00	338.00	535.00
Ni	491.00	108.00	249.00	390.00	585.00	530.00	82.80	104.00	304.00	158.00	100.00	98.30
As	18.90	416.00	625.00	266.00	271.00	1048.00	174.00	160.00	103.00	101.00	102.00	66.20
Th	1.35	0.24	0.47	0.70	0.26	1.30	0.35	0.22	0.11	0.19	0.86	0.61
Y	0.53	2.97	0.50	1.48	0.44	4.53	1.50	3.15	1.62	4.40	8.54	4.19
Zr	44.50	10.80	7.82	8.60	10.50	14.10	35.50	34.90	43.50	27.00	76.00	116.00
Hf	1.46	0.25	0.21	0.27	0.22	0.40	1.02	1.00	1.14	0.82	2.03	3.11
Nb	5.83	0.38	0.61	0.50	0.33	2.95	0.81	1.61	2.62	3.00	4.85	2.49
Ta	0.39	<0.05	<0.05	0.05	<0.05	0.29	0.06	0.10	0.17	0.17	0.35	0.18
La	0.43	4.53	1.26	4.94	0.72	1.32	2.41	2.64	0.58	2.30	9.81	8.07
Ce	0.66	9.10	1.55	7.09	0.72	2.25	5.00	5.39	1.13	5.04	20.70	15.90
Pr	0.08	1.24	0.13	0.78	0.08	0.24	0.58	0.70	0.18	0.68	2.44	2.04
Nd	0.27	4.69	0.44	2.45	0.26	0.83	2.26	2.84	0.70	3.04	10.10	7.92
Sm	0.21	0.84	0.67	1.78	1.30	0.31	0.46	0.63	0.27	0.63	1.91	1.34
Eu	0.05	0.14	0.06	0.13	0.12	0.05	0.14	0.28	0.05	0.27	0.68	0.42
Gd	0.07	0.85	0.07	0.30	0.06	0.26	0.45	0.67	0.21	0.84	2.03	1.33
Tb	0.05	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.11	0.05	0.15	0.30	0.18
Dy	0.08	0.53	0.07	0.25	0.05	0.47	0.33	0.65	0.29	0.82	1.69	0.93
Ho	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.11	0.06	0.11	0.05	0.15	0.30	0.14
Er	0.06	0.32	0.05	0.17	<0.05	0.41	0.14	0.31	0.19	0.48	0.80	0.44
Tm	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	<0.05	0.05	0.06	0.10	0.06
Yb	0.05	0.37	0.06	0.19	0.07	0.44	0.17	0.30	0.24	0.41	0.77	0.45
Lu	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05	<0.05	0.05	0.05	0.11	0.08
ΣREE	2.16	22.90	4.56	18.28	3.58	6.87	12.16	14.73	4.04	14.92	51.74	39.30
LREE	1.70	20.54	4.11	17.17	3.20	5.00	10.85	12.48	2.91	11.96	45.64	35.69
HREE	0.46	2.36	0.45	1.11	0.38	1.87	1.31	2.25	1.13	2.96	6.10	3.61
LREE/HREE	3.70	8.70	9.13	15.47	8.42	2.67	8.28	5.55	2.58	4.04	7.48	9.89
La_N/Yb_N	6.17	8.78	15.06	18.65	7.38	2.15	10.17	6.31	1.73	4.02	9.14	12.86
δEu	1.26	0.51	0.85	0.54	1.31	0.54	0.94	1.32	0.64	1.13	1.06	0.96
δCe	0.87	0.94	0.94	0.89	0.74	0.98	1.04	0.97	0.86	0.99	1.04	0.96
Co/Ni	0.42	0.68	0.83	0.17	0.19	0.38	6.35	3.74	2.47	2.01	3.38	5.44

3.3 同位素地球化学特征

3.3.1 硫同位素

硫同位素测试结果 (表 2) 显示, 矿石中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $9.9\text{‰}\sim12.9\text{‰}$, 均值为 11.27‰ ; 地层中的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $14.4\text{‰}\sim20.7\text{‰}$, 均值为 16.97‰ ; 李福让等 (2009) 在羊坪湾金矿床测得磁黄铁矿且黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $7.5\text{‰}\sim11.7\text{‰}$, 均值为 9.76‰ 。

3.3.2 铅同位素

烂木沟金矿区铅同位素测试结果见表 3。由表可知, 烂木沟金矿床矿石中硫化物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.560\sim20.206$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.668\sim15.708$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.257\sim38.860$; 地层中硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $18.502\sim20.086$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $15.644\sim15.788$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的值为 $38.475\sim38.907$ 。铅同位素参数由 Geokit 软件 (路远发, 2004) 计算所得。

表 2 石泉—旬阳金矿带中矿床矿石及地层中黄铁矿硫同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic compositions of pyrites and pyrrhotite in the ores, deposits and strata from the Shiquan-Xunyang gold ore belt

矿床名称	样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}\text{‰}$	样品描述	资料来源
烂木沟	ZX14070-11	黄铁矿	12.1	矿石	文中
烂木沟	ZX14070-12	黄铁矿	12.9	矿石	
烂木沟	ZX14073-1	黄铁矿	10.7	矿石	
烂木沟	ZX14073-2	黄铁矿	10.8	矿石	
烂木沟	ZX14073-3	黄铁矿	9.9	矿石	
烂木沟	ZX14073-6	黄铁矿	11.2	矿石	
烂木沟	ZX14125-1	黄铁矿	16.1	炭质片岩	文中
烂木沟	ZX14125-2	黄铁矿	18.5	炭质片岩	
烂木沟	ZX14125-3	黄铁矿	16.3	炭质粉砂质片岩	
烂木沟	ZX14126-2	黄铁矿	20.7	变质石英砂岩	
烂木沟	ZX14129-1	黄铁矿	18.4	粉砂质千枚岩	
烂木沟	ZX14129-2	黄铁矿	14.4	含炭质千枚岩	
烂木沟	ZX14131-1	黄铁矿	16.6	粉砂质板岩	
烂木沟	ZX14132-1	黄铁矿	16.0	粉砂质板岩	
烂木沟	ZX14135-1	黄铁矿	15.7	炭质板岩	
羊坪湾	S-48	磁黄铁矿	7.5	磁黄铁矿沿岩石片理穿入	李福让等，2009
羊坪湾	S-48	黄铁矿	8.9	黄铁矿沿岩石片理穿入	
羊坪湾	2076	磁黄铁矿	11.7	磁黄铁矿沿岩石片理穿入	
羊坪湾	2053	黄铁矿	11.3	黄铁矿沿岩石片理穿入	
羊坪湾	2102	黄铁矿	9.4	磁黄铁矿沿岩石片理及裂隙穿入	

表 3 烂木沟金矿床黄铁矿中铅同位素组成及特征

Table 3 Lead isotopic compositions in pyrites from the Lanmugou gold deposit

样品号	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
ZX14070-11	矿石黄铁矿	20.206	15.668	38.257	22.63	29.68
ZX14070-12	矿石黄铁矿	19.345	15.683	38.693	23.61	41.42
ZX14073-1	矿石黄铁矿	19.066	15.669	38.716	22.70	42.04
ZX14073-2	矿石黄铁矿	19.581	15.693	38.600	24.27	38.91
ZX14073-3	矿石黄铁矿	18.927	15.678	38.860	23.29	45.91
ZX14073-6	矿石黄铁矿	18.560	15.708	38.624	25.24	39.56
ZX14125-1	地层黄铁矿	18.502	15.645	38.475	21.13	35.55
ZX14125-2	地层黄铁矿	18.566	15.714	38.649	25.64	40.23
ZX14125-3	地层黄铁矿	18.566	15.715	38.651	25.70	40.29
ZX14126-2	地层黄铁矿	18.595	15.644	38.782	21.07	43.81
ZX14129-1	地层黄铁矿	20.086	15.788	38.907	30.47	47.18
ZX14129-2	地层黄铁矿	20.083	15.778	38.891	29.81	46.75
ZX14132-1	地层黄铁矿	18.547	15.691	38.571	24.13	38.13
ZX14135-1	地层黄铁矿	18.700	15.667	38.720	22.57	42.14

3.3.3 氢氧同位素

烂木沟矿区矿石中石英氢氧同位素组成见表 4，石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 13.5‰~15.9‰，平均值为 14.7‰，换算成流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值介于 0.5‰~2.9‰，平均值为 1.7‰， $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 -77.8‰~-71.3‰，平均值为 -74.55‰。由于烂木沟矿床研究尚处初步阶段，流体包裹体测温还未进行，文内换算中用到的均一温度根据王鹏等（2018）在矿带西段羊坪湾矿床测得的结果，按石英流体包裹体测温数据均值 200.8℃ 计算，测温区间为 160~260℃。李福让等（2009）在羊坪湾金矿床

测得 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值介于 2.96‰~5.03‰（ $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值取原文平均值），平均值为 4.28‰， $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 -86‰~-66‰，平均值为 -76.8‰。

3.3.4 Re-Os 同位素

此次对烂木沟金矿矿石中黄铁矿进行 Re、Os 同位素测试，结果见表 5。采用 ISOPLLOT 程序将测试数据进行计算，所得 5 个点等时线年龄为 $202\pm 13\text{ Ma}$ ，初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 2.9 ± 1.1 （图 6a），序号 1~4 点等时线年龄 $202\pm 12\text{ Ma}$ ，初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 3.08 ± 0.68 （图 6b）。由于测试对象为黄铁矿，矿物本身 Re、Os 含量低，造成等时线误差较大。

表 4 石泉—旬阳金矿带金矿床及旬阳地区志留系地层的氢氧同位素组成

Table 4 Hydrogen and oxygen isotopic compositions in the Shiquan-Xunyang gold ore belt and the Silurian in the Xunyang area						
矿床名称	样品编号	样品名称	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	资料来源
烂木沟	ZX14070-3	石英	13.5	1.91	-71.3	文中
烂木沟	ZX14070-10	石英	15.9	4.31	-77.8	
羊坪湾	S-108	石英	12.5	5.03	-86	
羊坪湾	S-118	石英	14.5	4.42	-81	李福让等, 2009
羊坪湾	S-7	石英	14.6	2.96	-79	
羊坪湾	S-127	石英	18.0	4.37	-66	
羊坪湾	S-29	石英	17.8	4.61	-72	
	XGD-13	硅质岩	18.1	2.92	-68	刘淑文, 2006
	XG-53	硅质岩	17.8	0.71	-77	
	XG-81	硅质岩	18.7	9.61	-79	
	XG-82	硅质岩	18.6	7.99	-80	
	XN-29	硅质岩	19.9	12.65	-82	
	XND-32	硅质岩	18.5	5.33	-79	
	XGD-01	地层中脉石英	18.0	10.77	-81	
	XGD-03	地层中脉石英	17.8	0.71	-79	

表 5 烂木沟金矿矿石中的黄铁矿 Re-Os 同位素

Table 5 Re-Os isotopic compositions in pyrites from the Lanmugou gold deposit											
序号	样品编号	Re/(ng/g)		普 Os/(ng/g)		$^{187}\text{Os}/(\text{ng/g})$		$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$		$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
1	ZX14073-1	1.1990	0.0090	0.0024	0.0000	0.0036	0.0000	2465.0	25.0	11.660	0.020
2	ZX14073-2	0.2137	0.0016	0.0012	0.0000	0.0009	0.0000	857.9	9.5	5.835	0.026
3	ZX14073-5	6.6310	0.0490	0.0027	0.0000	0.0152	0.0001	11763.0	121.0	42.600	0.130
4	ZX14070-11	0.8030	0.0059	0.0025	0.0000	0.0027	0.0000	1535.0	16.0	8.200	0.016
5	ZX14070-12	2.7630	0.0200	0.0047	0.0000	0.0072	0.0001	2842.0	29.0	11.710	0.020

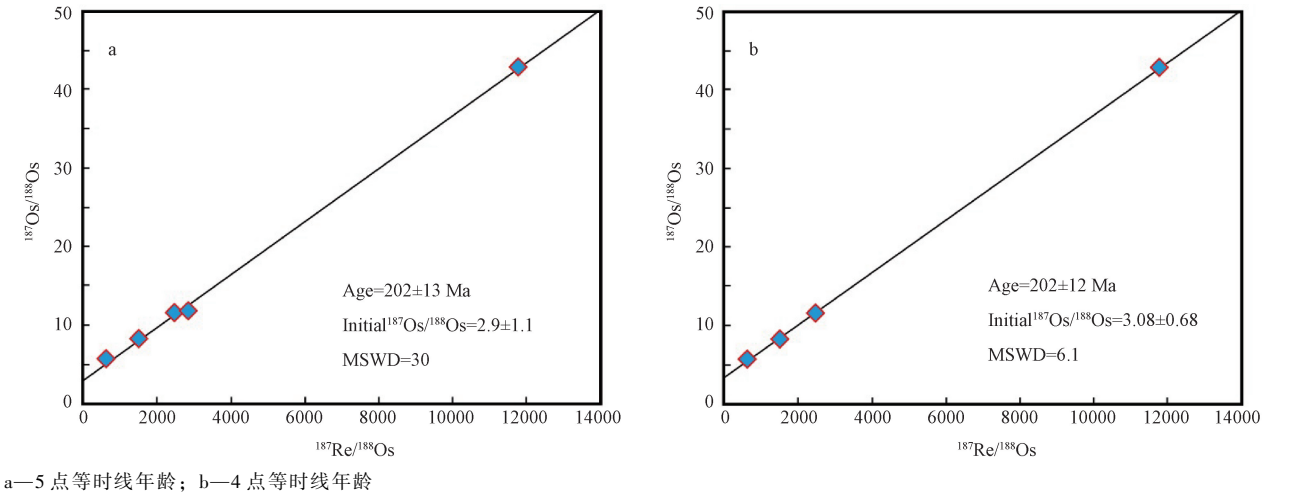


图 6 烂木沟金矿矿石中的黄铁矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 6 Re-Os isochron ages for pyrites from the Lanmugou gold deposit

(a) Isochron age of 5 pieces of data; (b) Isochron age of 4 pieces of data

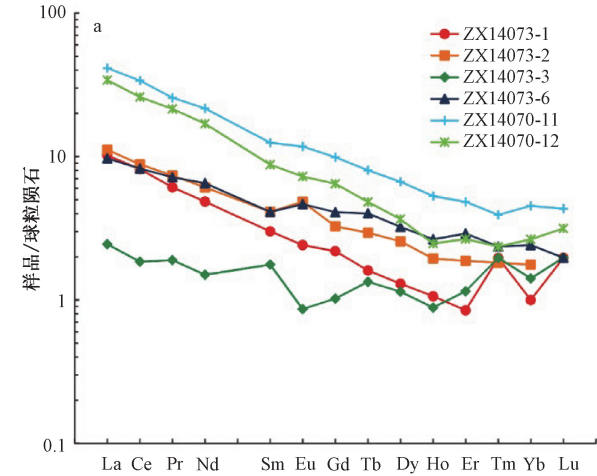
4 讨论

4.1 成矿物质来源

矿区地层中黄铁矿与矿石中黄铁矿的微量元素含量变化趋势总体一致, 但 Co/Ni 比值相差较大。

Co 和 Ni 是黄铁矿中常见的微量元素, 常以类质同象的形式替代黄铁矿中的 Fe, 利用黄铁矿 Co、Ni 元素含量及相关比值来探讨其形成环境和矿床成因。研究表明, 内生和外生条件下形成的黄铁矿具有不同的 Co/Ni 值, 其中与火山成因有关的黄铁矿其比值一般>1, 通常 5~50, 平均为 8.7; 热液成因的黄

铁矿 $1 < \text{Co}/\text{Ni} < 5$ ，平均为 1.7；沉积成因的黄铁矿 $\text{Co}/\text{Ni} < 1$ ，平均为 0.63。此次测试地层中黄铁矿 $\text{Co}/\text{Ni} < 1$ ，显示为沉积成因，说明这套变质岩系地层原岩为沉积岩系；矿石中黄铁矿 Co、Ni 含量与之正好相反， $w(\text{Co})$ 为 $317.00 \times 10^{-6} \sim 751.00 \times 10^{-6}$ ， $w(\text{Ni})$ 为 $82.80 \times 10^{-6} \sim 304.00 \times 10^{-6}$ ， Co/Ni 比值



a—矿石样品；b—地层样品

图 7 烂木沟金矿床矿石和地层中黄铁矿稀土元素配分图

Fig. 7 REE distribution of pyrite in ores and strata from the Lanmugou gold deposit

(a) Samples from ore; (b) Samples from strata

硫是大多数矿床中最重要的成矿元素之一，硫来源的研究可以为流体和物质来源提供重要信息。因为在热液成矿作用中存在同位素的分馏效应，使得热液形成的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般不等于热液 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$ 值，所以在判断硫源时，必须依据硫化物沉淀期间热液的总硫同位素组成 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$) (Ohmoto and Rye, 1997)。烂木沟金矿床的硫化物以黄铁矿为主 (90% 以上)，指示其主成矿期成矿流体具低氧逸度，且溶液中以某一种含硫原子团 (H_2S 或 SO_4^{2-}) 为主，这些金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 基本上反映了热液的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$ ，因此，成矿热液的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$ 可以近似等于硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 。从硫同位素看，烂木沟金矿硫同位素组成稳定，指示了矿石硫源的均一性，说明该矿床硫的来源较为均一。矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值虽低于地层硫，但总体上显示一定的亲缘性。从图 8 看，矿石黄铁矿中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在沉积岩区、变质岩区范围内。同时，矿带西段羊坪湾矿床 S 同位素与矿带东段烂木沟矿床 S 同位素较为接近。

在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图 (图 9) 上，矿石铅与地层铅组成一致，且铅同

介于 2.01 ~ 6.35，均值 3.90，与热液成因的黄铁矿特征接近，5.44 和 6.35 的比值显示部分成矿物质来源可能与火山作用有关。稀土元素总体含量不高 (表 1)，从稀土元素配分曲线看，轻稀土富集，矿石中与地层中黄铁矿配分曲线总体不相同 (图 7)，稀土元素显示物源与地层有关。

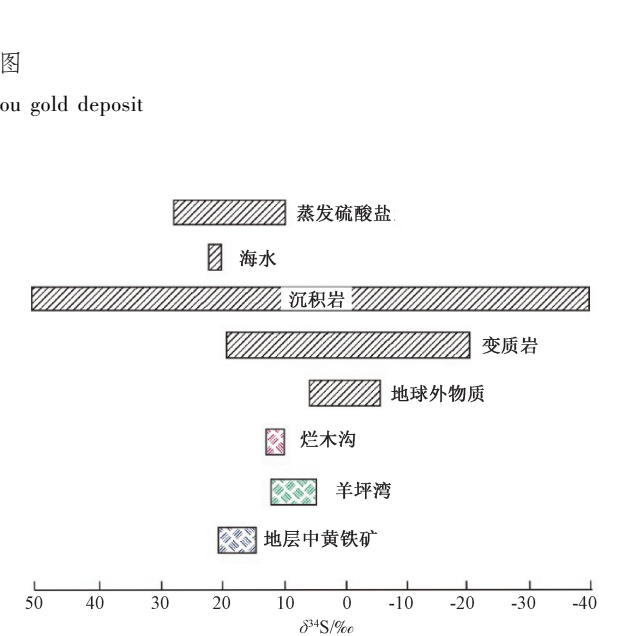
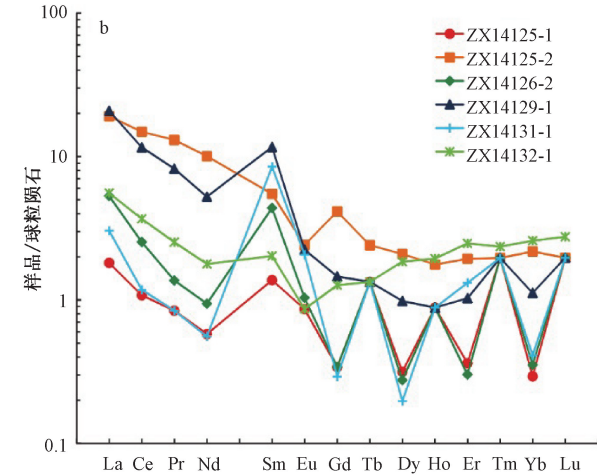


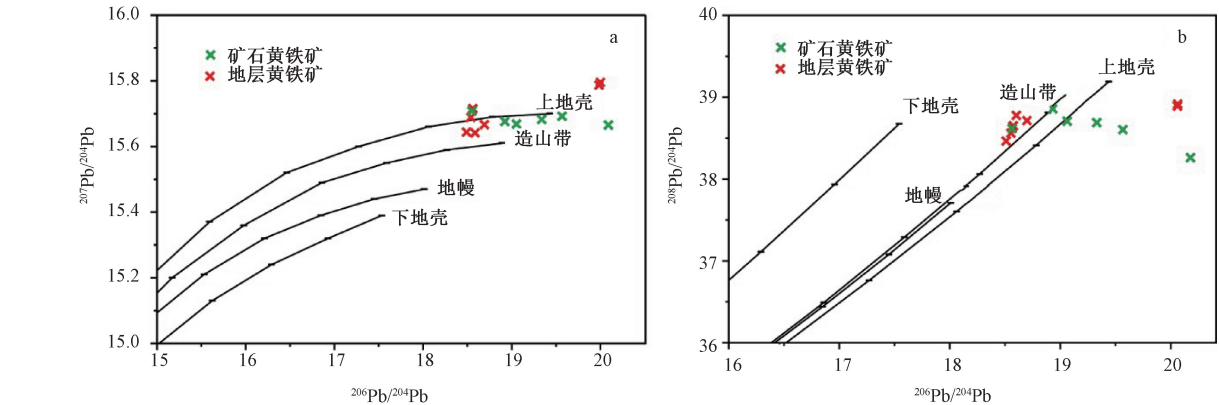
图 8 石泉-旬阳金矿带硫同位素分布图 (据韩吟文等, 2003 修)

Fig. 8 Sulfur isotopic distribution in the Shiquan-Xunyang gold deposit belt (modified from Han et al., 2003)

位素的组成范围较宽，数据集中在造山带线附近及其与上地壳线之间，并更接近于造山带线，表明了铅的来源为混合来源。朱炳泉等 (1998) 研究发现通过 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化能够反映源区的变化，并且根据不同成因类型矿石铅的资料和已知成因矿石铅资料，提出不同成因类型

的矿石矿物 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 图解。依据样品 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 相对于同时代地幔的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的偏差值 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$, 做出烂木沟金矿黄铁矿 Pb 同位素和地层岩石中 Pb 同位素的 $\Delta\beta -$

$\Delta\gamma$ 图解 (图 10), 数据点均落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围内。结合铅同位素构造模式图 (图 9) 和 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解 (图 10), 认为铅源具有壳、幔混合特征。

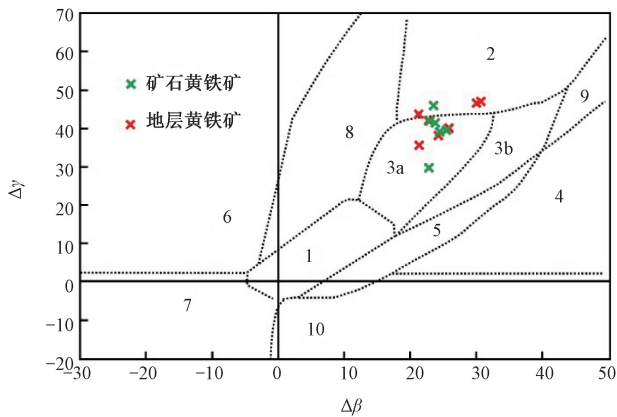


a— $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 模式图; b— $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 模式图

图 9 烂木沟金矿黄铁矿铅同位素构造模式图 (据 Zartman and Doe, 1981 修改)

Fig. 9 Lead isotopic diagram of pyrites from the Lanmugou gold deposit (modified from Zartman and Doe, 1981)

(a) Pattern diagram of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$; (b) Pattern diagram of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$



1—地幔源铅; 2—上地壳铅; 3—上地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—中深变质作用铅; 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

图 10 烂木沟金矿铅同位素 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解 (据朱炳泉等, 1998 修改)

Fig. 10 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ genetic classification diagram of lead isotope in the Lanmugou gold deposit (modified from Zhu et al., 1998)

The sources of Pb: 1—Mantle; 2—Upper crust; 3—Subduction zone of mantle mixed with upper crust (3a—magmatism; 3b—sedimentation); 4—Chemical sediment; 5—Seafloor hydrothermal solution; 6—Mesometamorphism; 7—Hypometamorphism of lower crustal; 8—Orogen; 9—Ancient shale of upper crustal; 10—Retrogressive metamorphism

系, 以及微量、稀土元素, S、Pb 同位素和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值信息, 推断烂木沟金矿成矿物质主要来源于地层, 更可能来自地层中的火山岩夹层。

4.2 成矿流体来源及属性

烂木沟金矿石英的 δD 值为 $-77.8\text{‰} \sim -71.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 的值为 $0.5\text{‰} \sim 2.9\text{‰}$, 在 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 关系图上 (图 11), 矿区成矿流体的 H-O 同位素组成落在岩浆水和变质水附近, 并且在雨水线与沉积岩区中间位置, 与区域上硅质岩和地层中脉石英相比, 局部较为接近, 表明烂木沟金矿成矿流体具有多属性, 由于矿区地层为变质岩系, 且含中基性火山岩夹层, 由此推断成矿流体主要源自建造水, 后经历区域变质作用及大气降水的加入, 在流体萃取火山岩层成矿物质的过程中, 具备了岩浆水和变质水的属性, 显示了混合源的特征, 就成矿流体属性而言, 总体应属变质流体。与羊坪湾金矿同位素对比, 羊坪湾金矿流体更接近变质水与岩浆水。

4.3 成矿时代及矿床成因分析

烂木沟矿区位于南秦岭石泉—神河构造岩片, 矿体赋存于脆—韧性剪切带内, 说明烂木沟金矿床成矿与中—晚三叠世秦岭碰撞造山密切相关。文中获得烂木沟金矿黄铁矿 Re-Os 同位素的等时线年龄 $202 \pm 12 \text{ Ma}$, 与同一矿带西段的羊坪湾金矿床黄

结合区内地层中有一套未划分的中基性火山岩

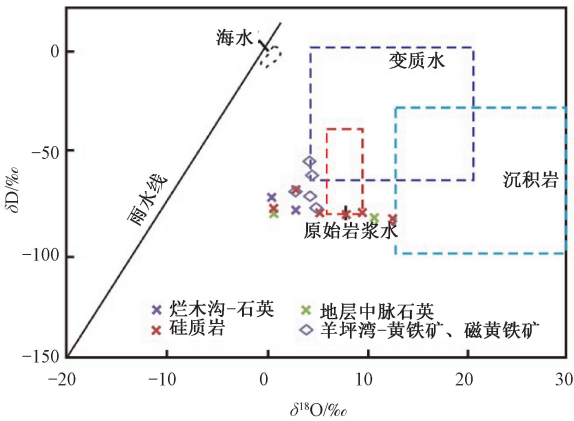


图 11 石泉-旬阳金矿带成矿流体及旬阳地区地层流体 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 图解 (据 Taylor, 1997; 陈岳龙等, 2005 修改)
Fig. 11 $\delta^{18}\text{O}$ - δD diagram of ore-forming fluids in the Shiquan-Xunyang gold belt and fluids of strata in the Xunyang area (modified from Taylor, 1997 and Chen et al., 2005)

铁矿 Rb-Sr 同位素年龄 $208 \pm 0.88 \text{ Ma}$ (高怀雄等, 2016) 较一致, 说明该等时线年龄较为可信, 烂木沟金矿形成于晚三叠世末期—早侏罗世早期。

从秦岭造山带地质演化历史分析, 推覆构造主体形成于 $236 \sim 213 \text{ Ma}$ (朱华平和付静茹, 2004), 韧性剪切作用即发育于此期间, 之后进入后碰撞调整阶段, 表现为勉略带发生伸展垮塌作用 ($\sim 200 \text{ Ma}$; Dong and Santosh, 2016), 形成勉县、青峰等一系列早侏罗世伸展断陷盆地 (Dong et al., 2011; 张国伟等, 2019)。因此, 金矿形成于秦岭碰撞造山背景下的伸展阶段。

石泉-旬阳金矿化带西段金矿床的研究表明, 脆-韧性剪切带至少存在 3 期构造变形, 金矿的形成与第 2 期 (S2) 构造变形密切相关, 矿体产状受 S2 构造面理控制, 成矿流体充填于早期形成的脆-韧性剪切带面理, 矿物沉淀富集 (高雅宁等, 2016; 杨兴科等, 2016; 韩珂等, 2018, 2020), 金成矿作用滞后于剪切作用过程。同时, 注意到韧性剪切与成矿时代在误差范围内较为接近, 推断成矿是在韧性剪切带持续演化过程中形成。剪切构造变形过程中, 剪切带在不同构造层次上同时表现出不同的变形特征, 成矿元素从深部韧性 (超韧性) 剪切变形域中活化迁出, 沿剪切带向上迁移到中、浅层次的脆韧性、脆性变形域中沉淀富集 (陈柏林等, 1999; 刘贵, 2020), 构造热事件与成矿事件属于同一演化过程的产物, 只是矿质的沉淀时间要略晚于深层次的韧性变形, 而与赋矿部位的脆韧性变形几乎是同步的 (王义天等,

2004; 刘贵, 2020)。因此, 推断烂木沟金矿成矿过程中, 俯冲碰撞挤压引起地层的区域变质脱水及大气降水补充是形成成矿流体的关键, 流体萃取火山岩中的成矿物质形成成矿流体上升, 在碰撞后的伸展阶段, 上升的成矿流体到达脆-韧性剪切带中, 利用了剪切带片理, 矿物沉淀富集, 形成烂木沟金矿床, 成矿类型为造山型金矿床。

5 结论

(1) 获得烂木沟金矿矿石中黄铁矿 Re-Os 同位素年龄为 $202 \pm 12 \text{ Ma}$, 结合区域构造演化历史和金矿成矿特征, 推断烂木沟金矿形成于晚三叠世末期—早侏罗世早期。

(2) 成矿流体来源于建造水和大气降水, 在区域变质和流体萃取成矿物质的过程中, 具备了岩浆水和变质水的属性, 总体应属变质流体; 成矿物质来源于地层中基性火山岩夹层。

(3) 烂木沟金矿是在早古生代含金背景较高的地层基础上, 经挤压变形和区域变质作用, 流体萃取中基性火山岩系的成矿物质, 之后沿韧性剪切带向上运移, 并在晚三叠世末期—早侏罗世早期秦岭造山带碰撞后的伸展阶段, 充填于脆-韧性剪切带片理中, 富集成矿, 成矿类型为造山型金矿床。

References

CHEN B L, DONG F X, LI Z J, 1999. Ore-forming model of ductile shear zone type gold deposits [J]. Geological Review, 45 (2): 186-192. (in Chinese with English abstract)
CHEN Y L, YANG Z F, ZHAO Z D, 2005. Isotopic Geochronology and Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-441. (in Chinese)
DONG Y P, ZHANG G W, NEUBAUER F, et al., 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41 (3): 213-237.
DONG Y P, SANTOSH M, 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling orogenic belt, Central China [J]. Gondwana Research, 29 (1): 1-40.
DU A D, HE H L, YIN N W, et al., 1994. A study on the Rhenium-Osmium geochronometry of molybdenites [J]. Acta Geologica Sinica, 68 (4): 339-347. (in Chinese with English abstract)
DU A D, ZHAO D M, WANG S X, et al., 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with carius tube sample preparation [J]. Rock and Mineral Analysis, 20 (4): 247-252. (in Chinese with English abstract)

- FAN P H, 2015. Ore-controlling structure characteristics of brittle-ductile shear zone and metallogenic regularity of gold in Jindoupo Hanyin County-Liushuping Hanbin area, South Qinling, China [D]. Xi'an: Chang'an University: 1-119. (in Chinese with English abstract)
- FENG M S, YANG J D, 1994. Basic characteristic of ductile nappe structure and its ore-control of gold deposit in North Ankang [J]. *Geology of Shaanxi*, 12 (1): 17-26. (in Chinese with English abstract)
- GAO H X, LI W B, XU F, et al., 2016. The research of gold metallogeny and prediction of mineral resources in Shiquan-Xunyang area, Shaanxi [R]. Xi'an: Shaanxi Province Geological Survey Institute. (in Chinese)
- GAO Y N, YANG X K, YANG L W, et al., 2016. Study on ore-controlling factors and mine exploration proposal of the gold ore field in North Hanyin, South Qinling [J]. *Journal of Geomechanics*, 22 (2): 245-255. (in Chinese with English abstract)
- HAN K, YANG X K, GAO Y N, et al., 2015. S₂ surface characteristics of Huanglong gold mine in Hanyin and its controlling effect on gold deposits [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35 (S1): 857-858. (in Chinese)
- HAN K, YANG X K, ZHANG J, et al., 2017. Characteristics of brittle-ductile shear zone and its control effect on gold mineralization in the Huanglong gold deposit, Hanyin, south Shaanxi province [J]. *Gold Science and Technology*, 25 (5): 18-29. (in Chinese with English abstract)
- HAN K, YANG X K, AN L, et al., 2018. S₂ foliation characteristics of brittle-ductile shear zone in the Huanglong gold deposit, Hanyin, South Qinling and its effect on mineralization [J]. *Northwestern Geology*, 51 (3): 171-184. (in Chinese with English abstract)
- HAN K, YANG X K, HE H J, et al., 2020. Characteristics of ore-controlling brittle-ductile shear zone and ages of deformation and mineralization in the Northern Hanyin gold field, South Qinling, China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44 (5): 801-818. (in Chinese with English abstract)
- HAN Y W, MA Z D, ZHANG H F, et al., 2003. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-369. (in Chinese)
- JIA F Y, ZHAO Y H, YANG B Z, 2016. Application of the trinity prospecting model in gold exploration: An example from the Bawangou gold deposit in Hanyin, Shaanxi [J]. *Journal of Geomechanics*, 22 (2): 185-198. (in Chinese with English abstract)
- JIAO J R, 2013. The ore control condition and prospecting direction of Lanmugou Au deposit in Xunyang, Shaanxi [J]. *Yunnan Geology*, 32 (1): 14-17. (in Chinese with English abstract)
- LI F R, HOU J F, YANG H, et al., 2009. Geological and geochemical characteristics and gold enrichment regularity of the Yangpingwan gold deposit in Shiquan, Shaanxi Province [J]. *Geology in China*, 36 (1): 174-183. (in Chinese with English abstract)
- LI H M, 1997. The geological characteristic of gold deposit belt in the Northern Shiquan-Hanyin, Shaanxi [J]. *Geology of Shaanxi*, 15 (2): 48-57. (in Chinese with English abstract)
- LI S G, SUN W D, ZHANG G W, et al., 1996. Geochronology and geochemistry of the Heigouxia metavolcanic rocks in the Mianlue tectonic belt, South Qinling: evidence from the Paleozoic ocean basin and its closure age [J]. *Science in China (Series D)*, 26 (3): 223-230. (in Chinese)
- LIU B J, XU X S, 1994. Atlas of the lithofacies and palaeogeography of South China [M]. Beijing: Science Press: 1-188.
- LIU G, 2020. Research progress of interaction of fluid with rock in ductile shear zone [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (2): 175-186. (in Chinese with English abstract)
- LIU S W, 2006. Research on episodic fluid diagenesis-mineralization in Paleozoic basins of southern Qinling region [D]. Xi'an: Chang'an University: 1-129. (in Chinese with English abstract)
- LU Y F, 2004. GeoKit-A geochemical toolkit for Microsoft excel [J]. *Geochimica*, 33 (5): 459-464. (in Chinese with English abstract)
- OHMOTO H, RYE R O, 1997. Isotopes of sulfur and carbon [M] // BERNES H L. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons: 509-567.
- SHA Y Z, WANG J C, KANG Q Q, et al., 2013. Analysis on geological characteristics and ore-controlling factors of Silurian gold mine in South Qinling the Xunyang Lanmugou area [J]. *Northwestern Geology*, 46 (2): 99-110. (in Chinese with English abstract)
- TAYLOR H P, 1997. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits [M] // BARNES H L, *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*: 229-259.
- WANG M L, 2007. The feature of ductile shear zone and ore-searching criteria of Yangpingwan Gold deposit in Shiquan county [J]. *Northwestern Geology*, 40 (S1): 30-36. (in Chinese with English abstract)
- WANG P, LIU J S, LI L B, 2018. Geology, ore-controlling factors and prospecting direction of gold deposits in black rock series in Yangpingguan of Shiquan county and Lanmugou of Xunyang County, Shaanxi province [J]. *Geology of Shaanxi*, 36 (2): 19-26. (in Chinese with English abstract)
- WANG R T, TAN X H, LI F R, et al., 2013. Metallogenic model and exploration pattern of Yangpingwan gold deposit, Shiquan County, Shaanxi Province, China [J]. *Northwestern Geology*, 46 (2): 93-98. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y T, MAO J W, LI X F, et al., 2004. Gold mineralization related to the shear zone [J]. *Earth Science Frontiers*, 11 (2): 393-400. (in Chinese with English abstract)
- XU T, 2016. Component features and tectonic evolution of Mianlue tectonic zone in Kangxian-Lueyang Area, south margin of Qinling orogen [D]. Xi'an: Chang'an University: 1-136. (in Chinese with English abstract)
- YANG H Y, WANG X, YANG X K, et al., 2015. The characteristics of new-born face of Changgou gold deposit in Hanyin County, South Qinling and its relationship with gold mineralization [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35 (S1): 957-958. (in Chinese)
- YANG L W, YANG X K, HAN K, et al., 2018. Fluid inclusions of the Changgou gold deposit in North Hanyin, South Qinling [J].

- Northwestern Geology, 51 (2): 178-185. (in Chinese with English abstract)
- YANG X K, HAN K, WU X, et al., 2016. The structural deformation and tectonic evolution of intra-continental orogeny in South Qinling orogen: Structural deformation analysis of the northern part of Shiquan-Hanyin belt in the late Indosinian-Yanshanian period [J]. Earth Science Frontiers, 23 (4): 72-80. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z J, WANG Z S, LIU D R, et al., 1990. 1:200000 geological map of Ankang [Z]. Bureau of Geology and Mineral Resources, Shaanxi Province. (in Chinese)
- ZARTMAN R E, DOE B R, 1981. Plumbotectonics-the mode [J]. Tectonophysics, 75 (1-2): 135-162.
- ZHANG G W, ZHANG Z Q, DONG Y P, 1995a. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogen: Implications for the tectonic evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 11 (2): 101-114. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G W, MENG Q R, LAI S C, 1995b. The structure of Qinling orogenic belt [J]. Science in China (Series B), 38 (11): 1379-1394.
- ZHANG G W, DONG Y P, YAO A P, 1997. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling orogenic belt [J]. Geology of Shaanxi, 15 (2): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G W, ZHANG B R, YUAN X C, et al., 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press: 1-855. (in Chinese)
- ZHANG G W, GUO A L, DONG Y P, et al., 2019. Rethinking of the Qinling orogen [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 746-768. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG K, 2012. Ore-controlling rules and prospecting indicator of Silurian system gold field structure in North Hanyin, South Qinlin [D]. Xi'an: Chang'an University: 1-88. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG K, YANG X K, YU H B, et al., 2020. Analysis of ore-controlling structure in the Changgou gold deposit of the northern Hanyin gold orefield, southern Qinling Mountains [J]. Journal of Geomechanics, 26 (3): 363-375. (in Chinese with English abstract)
- ZHU B Q, LI X H, DAI T M, et al., 1998. Theory and application of isotope system in earth science [M]. Beijing: Science Press: 1-330. (in Chinese)
- ZHU H P, FU J R, 2004. The Mesozoic and Cenozoic thrust nappe tectonic events and the formation of gold deposits in South Qinling [J]. Earth Science Frontiers, 11 (1): 168. (in Chinese)
- 附中文参考文献**
- 陈柏林, 董法先, 李中坚, 1999. 韧性剪切带型金矿成矿模式 [J]. 地质论评, 45 (2): 186-192.
- 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹, 2005. 同位素地质年代学与地球化学 [M]. 北京: 地质出版社: 1-441.
- 杜安道, 何红蓼, 殷宇万, 等, 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究 [J]. 地质学报, 68 (4): 339-347.
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 等, 2001. Carius 管溶样-负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄 [J]. 岩矿测试, 20 (4): 247-252.
- 樊楚贺, 2015. 南秦岭汉阴县金斗坡-汉滨区柳树坪脆-韧性剪切带控矿构造特征与金矿成矿富集规律 [D]. 西安: 长安大学: 1-119.
- 冯明伸, 杨建东, 1994. 安康地区北部韧性推覆构造基本特征及对金矿成矿控制作用 [J]. 陕西地质, 12 (1): 17-26.
- 高怀雄, 李卫波, 许锋, 等, 2016. 陕西石泉-旬阳金矿成矿规律研究与矿产资源预测 [R]. 西安: 陕西省地质调查院.
- 高雅宁, 杨兴科, 杨龙伟, 等, 2016. 南秦岭汉阴北部金矿田控矿要素研究及找矿方向建议 [J]. 地质力学学报, 22 (2): 245-255.
- 韩珂, 杨兴科, 高雅宁, 等, 2015. 汉阴黄龙金矿 S2 面理特征及其对金矿的控制作用 [J]. 矿物学报, 35 (S1): 857-858.
- 韩珂, 杨兴科, 张健, 等, 2017. 陕南汉阴黄龙金矿脆-韧性剪切带特征及其对成矿的控制作用 [J]. 黄金科学技术, 25 (5): 18-29.
- 韩珂, 杨兴科, 安乐, 等, 2018. 南秦岭汉阴黄龙金矿脆-韧性剪切带中 S₂ 面理特征及其对成矿的作用 [J]. 西北地质, 51 (3): 171-184.
- 韩珂, 杨兴科, 何虎军, 等, 2020. 南秦岭汉阴北部金矿田脆-韧性剪切带控矿特征及构造变形-成矿年代学研究 [J]. 大地构造与成矿学, 44 (5): 801-818.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等, 2003. 地球化学 [M]. 北京: 地质出版社: 1-369.
- 贾凤仪, 赵永辉, 杨本昭, 2016. “三位一体”找矿模型在金矿勘查中的应用: 以陕西省汉阴县坝王沟金矿为例 [J]. 地质力学学报, 22 (2): 185-198.
- 焦金荣, 2013. 陕西旬阳烂木沟金矿控矿条件与找矿方向 [J]. 云南地质, 32 (1): 14-17.
- 李福让, 侯俊富, 杨弘, 等, 2009. 陕西石泉县羊坪湾金矿床地质-地球化学特征及金的富集规律 [J]. 中国地质, 36 (1): 174-183.
- 李会民, 1997. 石泉-汉阴北部金矿带地质特征 [J]. 陕西地质, 15 (2): 48-57.
- 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 等, 1996. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学: 古生代洋盆及其闭合时代的证据 [J]. 中国科学 (D 辑), 26 (3): 223-230.
- 刘宝珺, 许效松, 1994. 中国南方岩相古地理图集 [M]. 北京: 科学出版社: 1-188.
- 刘贵, 2020. 韧性剪切带内的流体与岩石相互作用研究进展 [J]. 地质力学学报, 26 (2): 175-186.
- 刘淑文, 2006. 南秦岭古生代盆地演化中幕式流体成岩成矿作用研究 [D]. 西安: 长安大学: 1-129.
- 路远发, 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包 [J]. 地球化学, 33 (5): 459-464.
- 沙亚洲, 王菊婵, 康清清, 等, 2013. 南秦岭旬阳烂木沟地区下志留统金矿地质特征及控矿因素浅析 [J]. 西北地质, 46 (2): 99-110.
- 王民良, 2007. 石泉羊坪湾金矿床韧性剪切带特征及找矿标志 [J]. 西北地质, 40 (S1): 30-36.
- 王鹏, 刘军胜, 李龙斌, 2018. 陕西石泉羊坪湾-旬阳烂木沟一带

黑色岩系金矿地质特征及找矿方向 [J]. 陕西地质, 36 (2): 19-26.

王瑞廷, 谭兴华, 李福让, 等, 2013. 石泉县羊坪湾金矿床成矿模式及其找矿模型 [J]. 西北地质, 46 (2): 93-98.

王义天, 毛景文, 李晓峰, 等, 2004. 与剪切带相关的金成矿作用 [J]. 地学前缘, 11 (2): 393-400.

徐通, 2016. 秦岭南缘勉略构造带康县-略阳地区组成特征及构造演化研究 [D]. 西安: 长安大学: 1-136.

杨宏宇, 王新, 杨兴科, 等, 2015. 南秦岭汉阴县长沟金矿区新生面理特征及与金矿成矿关系 [J]. 矿物学报, 35 (S1): 957-958.

杨龙伟, 杨兴科, 韩珂, 等, 2018. 南秦岭汉阴北部长沟金矿床流体包裹体特征 [J]. 西北地质, 51 (2): 178-185.

杨兴科, 韩珂, 吴旭, 等, 2016. 南秦岭陆内造山构造变形特征与演化: 石泉—汉阴北部一带晚印支—燕山期构造变形分析 [J]. 地学前缘, 23 (4): 72-80.

杨增济, 王忠世, 刘德荣, 等, 1990. 1:20 万地质图 (安康幅) [Z]. 陕西省地质矿产局.

张国伟, 张宗清, 董云鹏, 1995a. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义 [J]. 岩石学报, 11 (2): 101-114.

张国伟, 孟庆任, 赖绍聪, 1995b. 秦岭造山带的结构构造 [J]. 中国科学 (B 辑), 25 (9): 994-1003.

张国伟, 董云鹏, 姚安平, 1997. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化 [J]. 陕西地质, 15 (2): 1-14.

张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等, 2001. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社: 1-855.

张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等, 2019. 关于秦岭造山带 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 746-768.

张康, 2012. 南秦岭汉阴北部志留系金矿田构造控矿规律及找矿标志研究 [D]. 西安: 长安大学: 1-88.

张康, 杨兴科, 于恒彬, 等, 2020. 南秦岭汉阴北部金矿田长沟金矿区控矿构造解析 [J]. 地质力学学报, 26 (3): 363-375.

朱炳泉, 李献华, 戴樟漠, 等, 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: 1-330.

朱华平, 付静茹, 2004. 南秦岭中新生代逆冲推覆构造事件与金矿的形成 [J]. 地学前缘, 11 (1): 168.