

云南金顶超大型铅锌矿床碳、氧、锶、铅 同位素地球化学

唐永永^{1,2}, 毕献武^{1*}, 武丽艳¹, 邹志超^{1,2}, 和利平³

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 云南金鼎锌业有限公司, 云南 兰坪 671401)

摘要: 云南金顶铅锌矿是目前中国最大的铅锌矿,也是铅锌矿金属储量超过千万吨的世界级超大型矿床之一。对该矿床主矿化期和矿化后期方解石进行了系统的碳、氧、锶同位素分析,结果表明,主矿化期脉状方解石碳同位素变化范围大($\delta^{13}\text{C}$ -23.0‰ ~ -2.6‰),显示有机沉积物与海相碳酸盐岩混合碳的特征,氧同位素相对集中($\delta^{18}\text{O}$ 22.1‰ ~ 23.5‰),类似于沉积岩, Sr 含量较高(Sr 163 ~ 1920 $\mu\text{g/g}$),富放射成因锶($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.709860 ~ 0.710362);而矿化后期结核状方解石碳同位素分布集中($\delta^{13}\text{C}$ -7.0‰ ~ -6.2‰),氧同位素($\delta^{18}\text{O}$ 20.2‰ ~ 22.4‰)类似于沉积岩,在 150 ~ 200 °C 时,据公式 $1000 \ln \alpha_{\text{方解石-水}} = 4.01 \times 10^6/T^2 - 4.66 \times 10^3/T + 1.71$ 计算,与矿化后期结核状方解石平衡的流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 流体介于 7.1‰ ~ 12.7‰ 之间,此外,结核状方解石 Sr 含量较高(Sr 240 ~ 817 $\mu\text{g/g}$),富放射成因 Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.710235 ~ 0.710347)。金属硫化物铅同位素($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.373 ~ 18.452, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.605 ~ 15.668, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 38.524 ~ 38.726)在铅演化图解上位于造山带演化线与上地壳演化线之间,变化范围类似于兰坪盆地上地壳沉积岩系和喜马拉雅期岩浆岩。综合分析认为,金顶铅锌矿至少存在两期热液矿化事件,主矿化期成矿流体主要来源于富含有机质的上三叠统三合洞组灰岩中的地层水,可能有深源组分的加入;矿化后期成矿流体体系大气降水。成矿流体在盆地中迁移时与围岩(含膏岩)发生了强烈的水岩反应。成矿金属可能来源于上三叠统三合洞组灰岩和喜马拉雅期岩浆岩。

关键词: 方解石; 碳、氧、锶同位素; 铅同位素; 金顶铅锌矿; 兰坪盆地

中图分类号: P595; P597; P61 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2013)05-0467-14

Carbon, oxygen, strontium and lead isotopic geochemistry in the Jinding super-large Zn-Pb deposit, Yunnan Province

TANG Yong-yong^{1,2}, BI Xian-wu^{1*}, WU Li-yan¹, ZOU Zhi-chao^{1,2} and HE Li-ping³

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Yunnan Jinding Zinc Industry Limited Company, Lanping 671401, China

Abstract: The Jinding Zn-Pb deposit in Yunnan Province, is the largest Zn-Pb deposit in China, and one of the world-class super-large deposits with Zn+Pb reserves more than 10 Mt. A systematic study of carbon, oxygen and strontium isotopes has been carried out on main mineralization vein calcites and post-mineralization nodule calcites. The main mineralization vein calcites show a large variation of $\delta^{13}\text{C}$ (-23.0‰ - -2.6‰), indicating mixed carbon source of sedimentary organics and marine carbonates, with high $\delta^{18}\text{O}$ (22.1‰ - 23.5‰) similar to the sediments, and high Sr contents (163 - 1920 $\mu\text{g/g}$), as well as $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.709860 - 0.710362). The post-mineralization nodule calcites have homogeneous $\delta^{13}\text{C}$ (-7.0‰ - -6.2‰) and $\delta^{18}\text{O}$ (20.2‰ - 22.4‰), high contents of Sr (240 - 817 $\mu\text{g/g}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.710235 - 0.710347). Besides, the calculated $\delta^{18}\text{O}$ of the ore-forming fluid equilibrated with the post-mineralization nodule calcites, range from 7.1‰ to 12.7‰ at 150 -

收稿日期(Received): 2012-11-15; 改回日期(Revised): 2013-01-28; 接受日期(Accepted): 2013-02-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421005); 中国科学院重要方向项目群项目(KZCX2-YW-Q04-01)

作者简介: 唐永永(1985-), 男, 博士研究生, 矿床地球化学专业。E-mail: yytang@mails.gyig.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): BI Xian-wu, E-mail: bixianwu@vip.gyig.ac.cn; Tel:+86-851-5891962

TANG Yong-yong et al.: Isotopic study on the Jinding super-large Zn-Pb deposit, Yunnan Province

200 °C by the equation $1000 \ln \alpha_{\text{calcite-water}} = 4.01 \times 10^6 / T^2 - 4.66 \times 10^3 / T + 1.71$ (Zheng, 1991). Pb isotopes in sulfides ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.373 – 18.452, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.605 – 15.668, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 38.524 – 38.726) plot between the line of orogenic Pb and the line of upper crustal Pb in Pb evolution diagram (Zartman and Doe, 1981), consistent with the Himalayan magmatism and partially overlapping with the upper crustal sedimentary rocks in the Lanping basin. These indicate that there were at least two episodes of hydrothermal mineralization in Jinding. The ore-forming fluid at the main mineralization stage might be the formation water originating from organic-rich limestones of the Upper Triassic Sanhedong Formation, apart from some involvement of deep-sourced components, whereas the ore-forming fluid at the post-mineralization stage is dominated by meteoric water. During migrating in the basin, the ore-forming fluids reacted with wall rocks and acquired high contents of radiogenic ^{87}Sr . Metals were likely provided by the Upper Triassic Sanhedong Formation limestones and Himalayan igneous rocks.

Key words: calcites; C-O-Sr isotopes; Pb isotope; Jinding Zn-Pb deposit; Lanping Basin

0 引言

云南省兰坪县金顶铅锌矿是目前中国最大的铅锌矿,也是铅锌矿金属储量超过千万吨的世界级超大型矿床之一(铅锌控制储量 1500 万 t,成矿总金属量大于 2200 万 t)^[1]。该矿床以成矿时代新、陆相红色碎屑岩容矿、成矿与构造关系密切等特征区别于以沉积岩为围岩的 MVT 型矿床、SEDEX 型矿床和 SST 型矿床,可能代表了沉积岩容矿铅锌矿床的一种新类型^[2-3]。关于金顶铅锌矿的成因机制争议较大,归纳起来可以区分为:同生成因^[4-10]和后生成因^[11-18]。王安建等^[3]指出,金顶超大型铅锌矿床近 30 年的成因争论恰好是由于其成矿时代、成矿的构造地质背景、容矿岩石的归属以及容矿岩石沉积环境和矿化时盆地演化的阶段等关键问题没有梳理清楚所致。同时,成矿流体的来源和演化以及成矿金属的来源也一直是该矿床研究的薄弱环节,这在一定程度上制约了对矿床成因的认识。

传统的碳、氧同位素研究在示踪成矿流体的来源和性质上具有优势,但难以判断流体的流经路线和运移过程。锶同位素研究正好弥补了这一不足,因为在不同地质环境下, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化范围明显不同,且成矿流体中的 Sr 一般是源区 Sr 和流经途径 Sr 的叠加,包含了源区和运移途径的信息^[19]。碳酸盐矿物方解石是进行这方面探讨的理想对象,其碳、氧、锶同位素在示踪成矿流体的来源和演化方面应用很广^[20-33]。方解石是金顶铅锌矿最主要的脉石矿物之一,可以为研究该矿床成矿流体的来源和演化提供重要信息。因此,本次研究选择该矿不同期次

热液方解石,拟通过对其碳、氧、锶同位素体系的系统研究,并结合硫化物铅同位素特征,探讨成矿流体来源和演化以及成矿金属的来源等问题,为进一步深入认识成矿机制奠定基础。

1 矿床地质特征

金顶铅锌矿产于滇西北兰坪新生代沉积盆地中部。兰坪盆地隶属昌都-思茅微板块,东侧以金沙江断裂带与扬子板块相接,西侧以澜沧江断裂带与保山地块毗邻(图 1a)。在古特提斯的基础上,盆地内沉积了中生代海相、陆相碳酸盐岩,火山碎屑岩和碎屑岩建造,地层中有多个陆相膏岩层,存在多个沉积间断^[1,35]。受古金沙江洋和古澜沧江洋相向俯冲以及印度-欧亚板块碰撞的影响,兰坪盆地在印支期具有残留海的性质,燕山期是凹陷盆地,喜马拉雅期属走滑拉分盆地^[16]。兰坪盆地火山岩浆活动分布主要集中在盆地东西两侧,并受控于深大断裂带,呈条带状展布。盆地中部出露岩浆岩很少,断裂控制亦很明显,规模较大的有云龙皂角厂岩体和永平卓番岩体,洱源上邑村岩体规模也较大^[36]。

金顶铅锌矿产于金顶穹窿内,矿区由北厂、跑马坪、架崖山、西坡、南厂、白草坪和蜂子山矿段组成(图 1b)。矿区断裂构造发育,东部的泚江断裂呈南北向展布,研究证实^[34],泚江断裂控制了云龙组沉积盆地的边界,由于长期活动切穿了不同层位的地层,成为本区主要的导矿构造。矿区地层分为原地系统和外来系统,外来系统推覆于原地系统之上。外来系统已经发生倒转,从上至下依次为上三叠统三合洞组、中侏罗统花开佐组和下白垩系景星

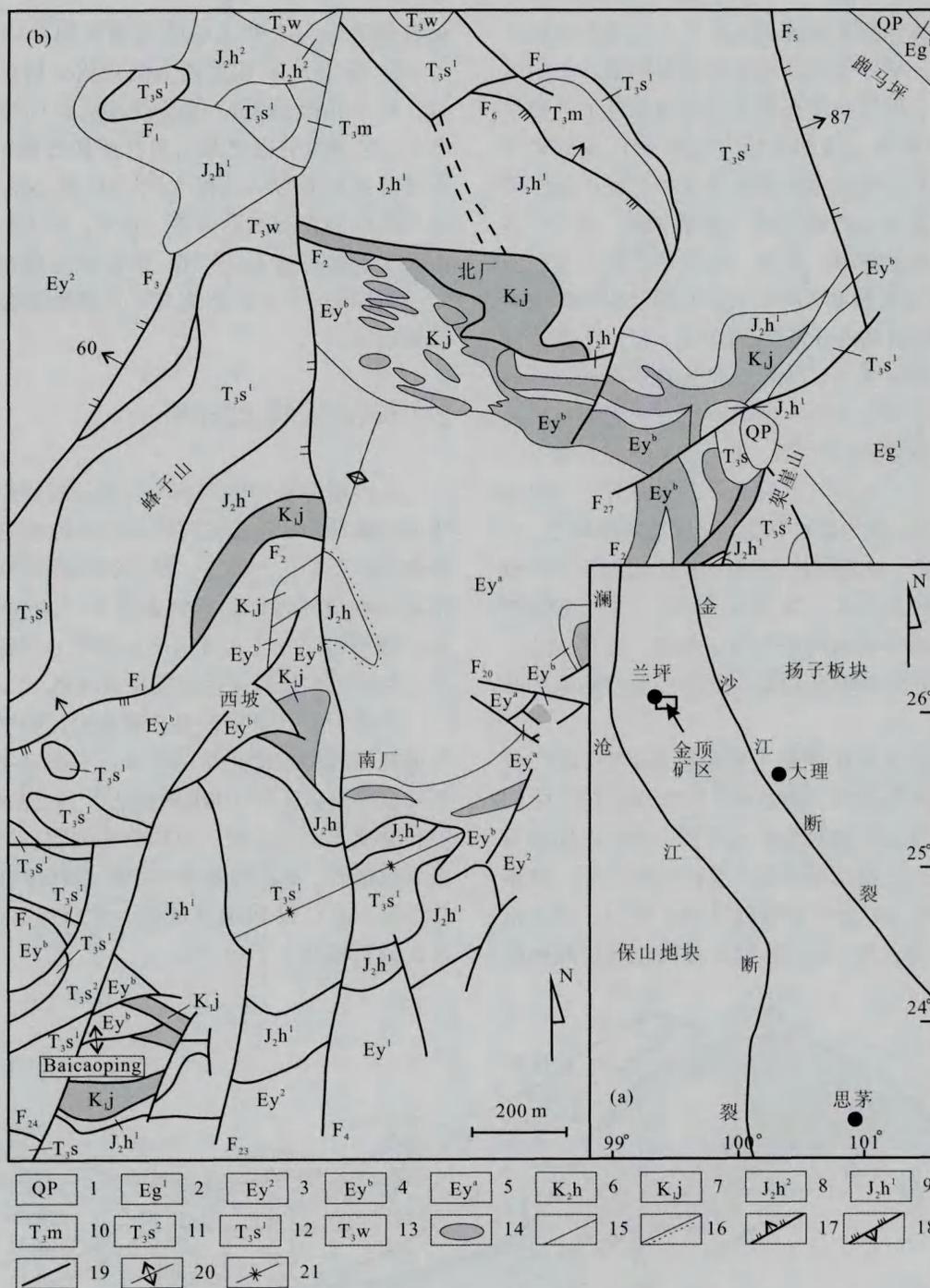


图 1 金顶铅锌矿在兰坪盆地中的位置(a)与矿区地质图(b)(据文献[34])

Fig.1 The location of the Jinding Zn-Pb deposit in the Lanping basin (a) and the geological map of the Jinding deposit

1-第四系砾石及砂土; 2-古新统果朗组泥质粉砂岩、细砂岩; 3-古新统云龙组泥砾岩, 夹石膏和粉砂岩; 4-古新统云龙组含石膏灰岩角砾岩、粉砂岩; 5-古新统云龙组含灰岩角砾的细砂岩、粉砂岩; 6-晚白垩系虎头寺组细粒石英砂岩; 7-早白垩系景星组石英砂岩和砂质灰岩角砾岩; 8-中侏罗统花开佐组粉砂质泥岩; 9-中侏罗统花开佐组粉砂岩和细砂岩; 10-上三叠系麦初青组粉砂质泥岩; 11-晚三叠系三合洞组钙质泥岩; 13-晚三叠系三合洞组含燧石、沥青白云质灰岩; 14-铅锌矿体; 15-地质界线; 16-不整合界面; 17-正断层; 18-逆断层; 19-不明性质断层; 20-背斜; 21-向斜

1-Pleistocene gravel and sand; 2-Paleocene Guolang Fm. muddy siltstone intergrown with fine sandstone; 3-Paleocene Yunlong Fm. conglomerates entraining gypsum and siltstone; 4-Paleocene Yunlong Fm. gypsum-bearing limestone breccia and siltstone; 5-Paleocene Yunlong Fm. fine sandstone and siltstone containing limestone blocks; 6-Upper Cretaceous Hutousi Fm. fine quartzite sandstone; 7-Lower Cretaceous Jingxing Fm. quartzite sandstone and sandy limestone breccia; 8-Middle Jurassic Huakaizuo Fm. silty mudstone; 9-Middle Jurassic Huakaizuo Fm. siltstone and fine sandstone; 10-Upper Triassic Maichuqing Fm. silty mudstone; 11-Upper Triassic Sanhedong Fm. calcareous mudstone; 12-Upper Triassic Sanhedong Fm. firestone- or bitumen-bearing dolomitic limestone; 13-Upper Triassic Waigucun Fm. muddy siltstone; 14-Zn-Pb ore; 15-Geological boundary; 16-Unconformable boundary; 17-Normal fault; 18-Thrust fault; 19-Ambiguous fault; 20-Anticline axes; 21-Syncline axes

组。原地系统包括古新统云龙组、上白垩系南新组和虎头寺组。矿体受构造和岩性控制明显,主要以板状、层状、似层状产在推覆构造中及其上下的景星组(上含矿带)和云龙组上段(下含矿带)。铅锌矿体环绕穹窿核心边缘呈不规则环带分布,在矿区东部东倾,北部北倾,西部西倾,南部南倾,并且矿体越靠近穹窿顶部越厚。此外,矿区还产出大量的硫酸盐岩(主要为石膏和天青石),它们围绕铅锌矿体断续展布,形成明显的分带特征(图2)。矿区主要发育两种类型的铅锌矿石:砂岩型和灰岩角砾岩型。两者的矿物组分大致相同,金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和白铁矿,非金属矿物有方解石、石英、天青石、重晶石、石膏和硬石膏等。砂岩型矿石组构简单,常为胶结结构、细粒浸染状构造,少量为块状构造,伴随硅化、黄(白)铁矿化以及方解石化;灰岩角砾岩型矿石常呈晶粒结构、交代溶蚀结构、胶状同心环状结构和嵌晶结构等,脉状构造、块状构造、环状-环带状构造、胶状-变胶状构造和晶洞构造等。

方解石作为成矿期最主要的脉石矿物,其产状复杂,具有多期次性。根据其产状和与铅锌矿化的关系,可分为主矿化期和矿化后期。主矿化期常为脉状方解石,呈粗晶亮晶状,晶粒大小不等,脉宽常小于1 cm,主要产于角砾岩型矿石中,与方铅矿和闪锌矿等共生,或呈晶粒状与硫化物一起胶结

灰岩角砾,与之共生的硫化物呈细晶结构(图3a,图3b,图3c);矿化后期为结核状方解石,呈粗晶状,产于角砾岩型矿石或砂岩型矿石的溶蚀孔洞中,与之共生的硫化物以黄铁矿和方铅矿为主,特别是方铅矿通常结晶粗大(图3d,图3e),同期还形成簇状天青石和石膏等。此外,还从断裂破碎带中采得泥状方解石(图3f),断层泥发育黄铁矿化蚀变,可能代表了主矿化期成矿流体沿着破碎带运移时的痕迹。

2 样品采集及分析

本次研究所用方解石来自金顶铅锌矿北厂、架崖山和跑马坪矿段。先将矿石样品碎至40~80目,在双目镜下手选方解石,使其纯度达到99%以上,再用玛瑙研钵将纯净方解石磨至200目供测试分析。使用相同方法,挑选出方铅矿、闪锌矿和黄铁矿,制成单矿物粉末供铅同位素分析。

方解石碳、氧同位素分析在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。碳、氧同位素测试采用100%磷酸法^[37],之后利用MAT 251型质谱仪进行碳、氧同位素测定,选用国家一级碳酸盐碳、氧同位素参考物质GBW04416作为工作标准, $\delta^{13}\text{C}$ 以PDB为标准, $\delta^{18}\text{O}$ 以SMOW为标准,分析精度小于 $\pm 0.2\%$ 。

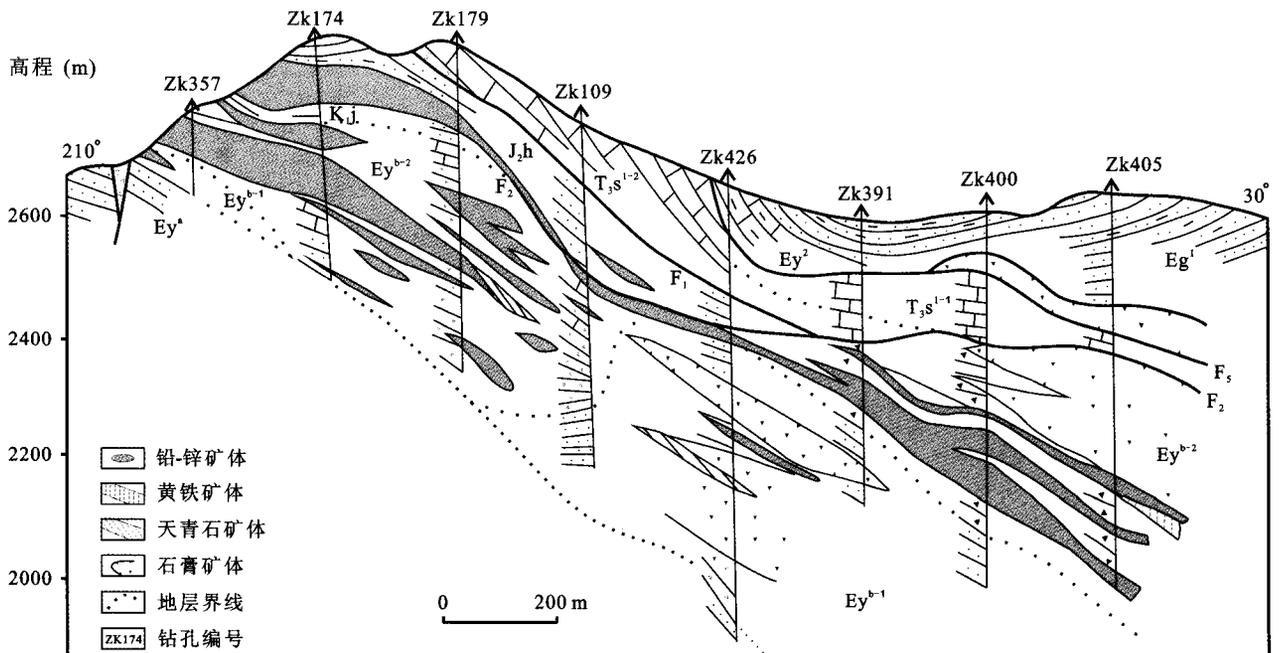


图2 金顶北厂-跑马坪矿段地质剖面(据文献[34])

Fig.2 Geological section of Beichang-Paomaping ore blocks in the Jinding deposit

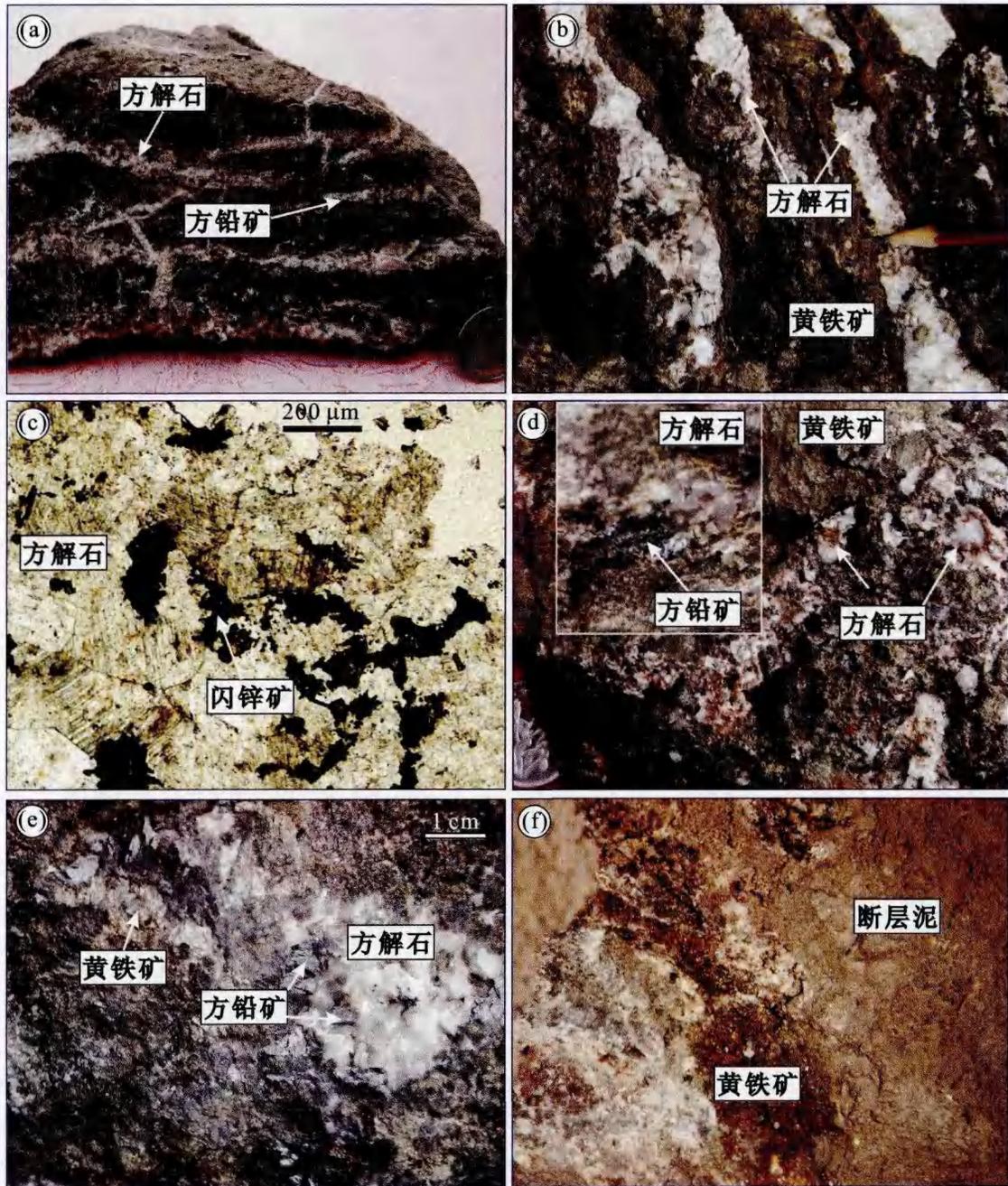


图 3 金顶铅锌矿矿石矿物组合

Fig.3 Ore mineral assemblages in the Jinding Zn-Pb deposit

(a) 灰岩角砾岩型矿石, 脉状方解石与细脉状方铅矿共生, 沿裂隙穿插切割围岩; (b) 野外露头上的灰岩角砾岩型矿石, 方解石脉与黄铁矿共生; (c) 灰岩角砾岩型矿石中的方解石脉, 方解石颗粒间隙中生长闪锌矿; (d) 砂岩型矿石, 发育黄铁矿化, 结核状方解石产于溶蚀的空隙中, 有时在方解石边缘见方铅矿; (e) 灰岩角砾岩型矿石, 结核状方解石与黄铁矿、方铅矿共生产于溶蚀空洞中; (f) 断裂破碎带中的断层泥, 发育黄铁矿化, 断层泥中富含方解石、石英、高岭石和蒙脱石等黏土矿物

(a) Vein calcites coexisted with galena veinlets in limestone breccia ores; (b) Limestone breccia ores at outcrops, show vein calcite intergrown with pyrites; (c) Limestone breccia ores with vein calcite accompanied by sphalerite; (d) Sandstone ores with pyrite mineralization, nodule calcite occurs in dissolution cavities, and sometimes accompanying galena asides; (e) Limestone breccia ores with nodule calcite occurring in the dissolved cavities, and sometimes accompanying galena asides; (f) Fault gouge, composed of pyrites, calcites, quartz, kaolinites and smectites etc

方解石的 Rb、Sr 含量以及锶同位素测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。Rb、Sr 含量分析使用仪器为 ELAN DRC-e 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS), 分析误差小

于 10%, 分析流程见文献[38]。方解石 Rb、Sr 的分离以及锶同位素比值测试流程见文献[39-40]。先称取 100 mg 左右的样品, 加入适量纯化的 2.5 mol/L HCl 溶解, 将溶解好的清液移入离心管后置入离心

机离心 10 min。然后用装有 2 mL AG-50W-X12 树脂(200 ~ 400 目)的石英交换柱进行 Sr 的分离和纯化。铷同位素比值测定在 Finnigan 公司 MAT 262 型热电离质谱计上完成,所有数据均用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 进行校正,该实验室对国际标样 NBS 987 分析结果为 0.710259 ± 10 ($n=8$)。

硫化物的铅同位素测试在核工业北京地质研究院进行。首先称取适量样品,用 $\text{HF} + \text{HClO}_4$ 溶解,之后使用强碱性阴离子交换树脂依次加入纯化的 HBr 和 HCl 对 Pb 进行分离。最后在 ISOPROBE-T 热电离质谱计上测定铅同位素比值。实验采用国际标样 NBS 981 进行监控,其测试结果为 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2.1651$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.91384$, $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.059169$ 。

3 结果

3.1 碳、氧同位素

金顶铅锌矿方解石碳、氧同位素测试结果见表 1 和图 4。主矿化期脉状方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-23.0\% \sim -2.6\%$, 平均值为 -12.0% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $22.1\% \sim 23.3\%$, 平均值为 22.7% ; 矿化后期结核状方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分布集中, 变化于 $-7.0\% \sim -6.2\%$, 平均值为 -6.6% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $20.2\% \sim 22.4\%$, 平均值为 21.5% ; 而断裂破碎带中泥状方解石碳、氧同位素特征类似主矿化期脉状方解石, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为

$-20.2\% \sim -2.8\%$, 平均值为 -11.3% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $22.4\% \sim 24.5\%$, 平均值为 23.5% 。

3.2 铷同位素

金顶铅锌矿方解石 Rb、Sr 含量及铷同位素结果见表 1。总的来讲,方解石 Rb 含量很低, Sr 含量较高,变化较大,富放射成因 ^{87}Sr , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分布集中。主矿化期方解石 Rb 含量变化于 $0.02 \sim 0.22 \mu\text{g/g}$, 平均为 $0.12 \mu\text{g/g}$, Sr 含量为 $175 \sim 1920 \mu\text{g/g}$, 平均为 $561 \mu\text{g/g}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 $0.709860 \sim 0.710362$ 之间, 平均值为 0.710166 ; 矿化后期结核状方解石 Rb 含量为 $0.06 \sim 0.13 \mu\text{g/g}$, 平均为 $0.10 \mu\text{g/g}$, Sr 含量为 $240 \sim 817 \mu\text{g/g}$, 平均为 $435 \mu\text{g/g}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 $0.710235 \sim 0.710347$ 之间, 平均值为 0.710286 ; 断裂破碎带中泥状方解石 Rb 含量为 $0.09 \sim 0.61 \mu\text{g/g}$, 平均为 $0.33 \mu\text{g/g}$, Sr 含量为 $208 \sim 11600 \mu\text{g/g}$, 平均为 $4913 \mu\text{g/g}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 $0.709742 \sim 0.710099$ 之间, 平均值为 0.709880 。

3.3 铅同位素

10 件金属硫化物(方铅矿、闪锌矿和黄铁矿)铅同位素分析结果见表 2 和图 5。本研究中的铅同位素测试结果分布相对集中,富放射成因 Pb。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $18.373 \sim 18.460$, 平均值为 18.425 , $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $15.605 \sim 15.665$, 平均值为 15.635 , 而 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $38.524 \sim 38.694$, 平均值为 38.615 。

表 1 金顶铅锌矿方解石碳、氧、铷同位素及 Rb、Sr 含量分析结果
Table 1 C-O-Sr isotopes and the contents of Rb and Sr in calcites in the Jinding Zn-Pb deposit

矿化期次	样号	描述	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (‰)	Rb ($\mu\text{g/g}$)	Sr ($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$
主矿化期	JD09-15	北厂矿段, 细脉状方解石, 灰岩型矿石	-23.0	23.4	0.19	1920	0.710257±8
	JD09-45	北厂矿段, 脉状方解石, 灰岩型矿石	-22.6	23.5	0.10	513	0.710194±10
	JDJ10-22	北厂矿段, 细脉状方解石, 灰岩型矿石	-15.6	22.8	0.02	175	0.710362±10
	JDF10-22-1	北厂矿段, 脉状方解石, 弱矿化	-3.9	22.3	0.08	163	
	JDJ10-27	北厂矿段, 脉状方解石, 矿体夹层	-4.3	22.1	0.22	316	0.709860±4
	JDJ10-37	北厂矿段, 脉状方解石, 弱矿化	-2.6	22.4	0.11	276	0.710158±40
矿化后期	JDJ10-15A	架崖山矿段, 团块状方解石, 灰岩型矿石	-6.2	20.2	0.10	240	0.710276±10
	JDJ10-13	架崖山矿段, 团块状方解石, 灰岩型矿石	-7.0	22.0	0.13	248	0.710347±5
	JDJ10-40	架崖山矿段, 团块状方解石, 灰岩型矿石	-6.5	22.4	0.06	817	0.710235±10
	JD10-3	跑马坪矿段, 断裂破碎带泥状方解石, 伴生黄铁矿	-20.5	22.4	0.61	11600	0.710099±5
JD10-11	跑马坪矿段, 断裂破碎带泥状方解石, 伴生黄铁矿	-2.8	24.5	0.29	2930	0.709742±8	
JD10-18	跑马坪矿段, 断裂破碎带泥状方解石, 伴生黄铁矿	-10.5	23.5	0.09	208	0.709798±10	

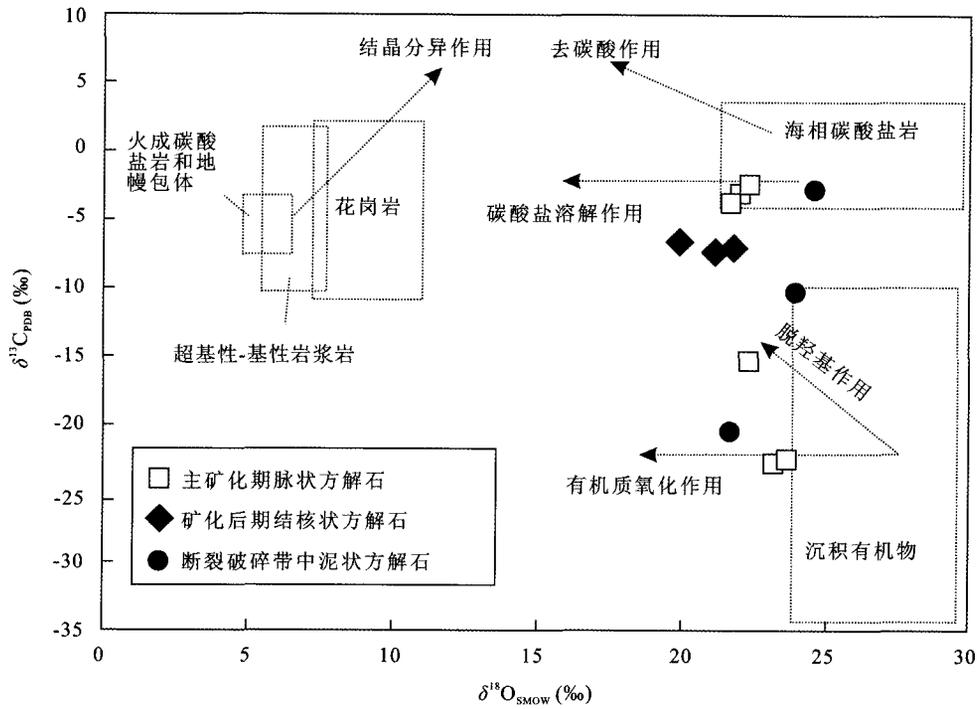


图 4 金顶铅锌矿矿石中方解石碳、氧同位素组成(底图据文献[41])

Fig.4 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ diagram of calcites in ores in the Jinding Zn-Pb deposit

表 2 金顶铅锌矿金属硫化物铅同位素分析结果

Table 2 Pb isotopes in the sulfide minerals in the Jinding Zn-Pb deposit

样号	单矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	C-K 模式年龄(Ma)	μ	数据来源	
JDPMP6	方铅矿	18.407	15.621	38.567	196	9.51	本研究	
JDF10-13	方铅矿	18.424	15.642	38.631	209	9.54		
JD09-54	方铅矿	18.460	15.665	38.713	211	9.59		
JDJ10-17	方铅矿	18.443	15.661	38.694	219	9.58		
JD-05	方铅矿	18.429	15.622	38.576	181	9.51		
JDBC3	方铅矿	18.429	15.624	38.578	183	9.51		
JD09-21	闪锌矿	18.428	15.634	38.618	196	9.53		
JD-05	闪锌矿	18.429	15.634	38.612	196	9.53		
JD09-12	黄铁矿	18.373	15.605	38.524	200	9.48		
JD09-45	胶黄铁矿	18.430	15.643	38.640	206	9.55		
JDJ1-5	方铅矿	18.452	15.665	38.711	217	9.59		
JDJ1-9	胶黄铁矿	18.454	15.668	38.726	220	9.59		
PMP1-2	方铅矿	18.440	15.664	38.703	224	9.59		[42]
PMP1-1	方铅矿	18.437	15.663	38.696	225	9.58		
PMP1-5	胶黄铁矿	18.432	15.663	38.700	229	9.59		

4 讨论

4.1 方解石碳、氧同位素组成及其意义

研究表明, 热液方解石碳、氧同位素组成是示踪成矿流体来源的有效手段^[25,28,32,33,47]。Ohmoto^[48]

研究指出, 当矿床内热液脉中无石墨与方解石共生时, 方解石(或包裹体热液中的 CO_2)的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)可以近似作为成矿溶液的总碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C}}$)。通常, 热液中的 CO_2 有三种来源: 有机源、海相碳酸盐岩和岩浆-地幔源。刘建明等^[41]利用 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 图解分析了由以上三种物源通过不同途径

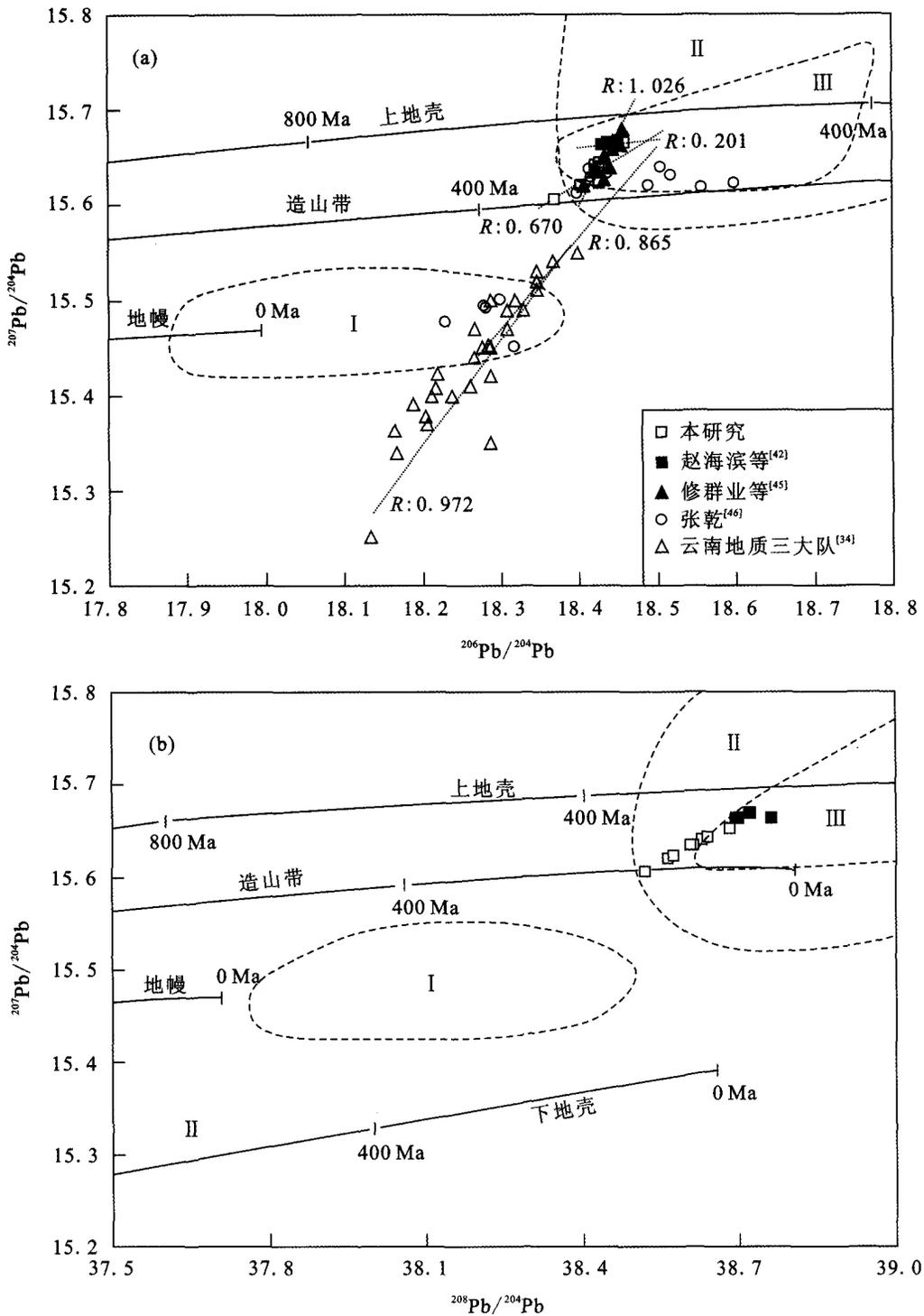


图5 金顶铅锌矿硫化物铅同位素组成(底图据文献[43])

Fig.5 Lead isotopic composition of sulfides in the Jinding Zn-Pb deposit

I-滇西上地幔, 数据来自文献[44]; II-兰坪盆地上地壳沉积岩系, 数据来自文献[44]; III-兰坪盆地新生代岩浆岩, 数据来自文献[9]

产生 CO_2 时碳同位素的变化(图 4)。

金顶铅锌矿方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围大, $\delta^{18}\text{O}$ 相对集中, 类似于沉积岩。主矿化期脉状方解石中的碳具有多源性, 一部分样品沿着海相碳酸盐溶解作用分布, 另一部分沿着沉积有机物的氧化作用分布,

表明海相碳酸盐岩与沉积有机物是流体中碳的最主要的来源。而兰坪盆地区域上分布最广泛的上三叠统三合洞组是一套灰黑色、深灰色海相、潟湖相泥灰岩、富碳灰岩, 其有机碳含量为 0.7%~3.4%, 这些灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-21.8\text{‰} \sim -19.6\text{‰}$ ^[9], 接近于

矿石中沥青的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ -27.7‰ ~ -27.4‰, 据文献[49])。在热液作用下, 灰岩有机质中 ^{12}C — ^{12}C 键分解能小于 ^{13}C — ^{13}C 键, 富含 ^{12}C 的简单分子烷烃类首先被氧化, 形成富含 ^{12}C 的 CO_2 , 促使这些热液成因的方解石较之其他方解石及灰岩富集轻碳^[9]。由于海相灰岩的溶解和脱水作用, 同时伴随着有机质的热裂解, 成矿流体中的碳可能主要来自于海相碳酸盐岩和沉积有机物。这指示了主矿化期成矿流体可能来源于含有机质丰富的上三叠统三合洞组灰岩中的地层水。而断裂破碎带中的泥状方解石碳、氧同位素特征类似于主矿化期脉状方解石, 指示两者具有同源性。此外, 脉状方解石显示轻稀土元素富集, 轻重稀土元素显著分异, 富集Co、Mo、W、Mo和Bi等, 流体包裹体显示相对高温高盐的特征(均一温度大于250℃, 盐度大于8%NaCl), 暗示了其成矿流体中可能有深源组分的加入^[50]。

矿化后期结核状方解石在 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 图上投在海相碳酸盐岩溶解作用线附近, 但有所偏离。其 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化于-7.0‰~-6.2‰之间, 平均值为-6.6‰, 通常这种碳同位素组成表明, 流体中的碳来自于深部或者碳酸盐与有机碳的混合作用^[25,51]。而该期方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值较窄的变化范围, 排除了有机物为方解石提供主要碳的可能性。罗君烈等^[9]研究发现石英砂岩胶结物中的方解石($\delta^{13}\text{C}$ -8.1‰~-4.9‰, 平均值-6.5‰)具有明显的淡水方解石的碳同位素特征, 在一定程度上可反映其生成环境。而方解石的氧同位素组成主要受流体中水的氧同位素控制^[25]。金顶铅锌矿流体包裹体研究表明成矿均一温度为54~370℃, 晚期主要集中在150~200℃之间^[9,42,50,52,53]。据Zheng^[54]在方解石与水处于氧同位素平衡时的分馏方程($1000 \ln \alpha_{\text{方解石-水}} = 4.01 \times 10^6/T^2 - 4.66 \times 10^3/T + 1.71$)计算, 与矿化后期结核状方解石平衡的流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$ 介于7.1‰~12.7‰之间, 该值偏离原生水(约5‰~7‰)和岩浆水(约5.5‰~8.5‰)^[55], 也明显大于滇西地区中新世大气降水的组成($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = -16‰ \sim -10‰$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} = -110‰ \sim -90‰$)^[56]。从氢、氧同位素角度来看, 与矿化后期结核状方解石同时形成的天青石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为-8.64‰, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为-100.55‰, 靠近大气降水线, 指示成矿溶液较多地来自大气降水^[9]。所以, 笔者认为矿化后期成矿流体体系大气降水, 它与围岩发生了强烈的水岩反应, 致使流体的

氧同位素发生了较大的正向漂移, 从而导致方解石氧同位素组成具有类似沉积岩的特征。

4.2 方解石锶同位素特征

由表1可以看出, 金顶铅锌矿方解石Rb含量很低(0.02~0.22 μg/g), 而Sr含量偏高(163~11600 μg/g), 这主要由方解石的晶体结构特征所决定。在含钙矿物晶格中, Ca的位置可以有限地容纳Sr而不接受Rb^[57], 使得方解石中的Rb/Sr比值很小, Rb衰变产生的 ^{87}Sr 对体系初始锶同位素组成影响极小。因此, 方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值可以视为其沉淀时成矿流体的初始锶同位素组成。

由于在不同地质环境下, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化范围明显不同, 且成矿流体中的Sr一般是源区Sr和流经途径Sr的叠加, 包含了源区和运移途径的信息^[19]。Sr在海水中滞留时间(约2~4 Ma)远长于海水的混合时间(约 1.5×10^3 a), 因此可以认为海水中锶同位素的分布是均一的, 并且海水中碳酸盐岩矿物沉淀时没有明显的锶同位素分馏, 其锶同位素组成与海水基本一致^[58]。所以, 矿区上三叠统三合洞组海相灰岩的锶同位素组成应该相当于晚三叠世古海水的锶同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.707594~0.707844, 据文献[59])。而金顶铅锌矿方解石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于0.709742~0.710362之间, 平均值为0.710121, 类似于罗君烈等^[9]的分析结果($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.70777~0.71185, 平均值为0.71062), 明显高于上三叠统三合洞组灰岩, 暗示了成矿流体形成以后流过了富放射成因 ^{87}Sr 的地质体。一般来讲, 大陆地壳富放射成因 ^{87}Sr 的潜在来源为火成硅酸盐矿物或Rb/Sr比值较高的碎屑岩。兰坪盆地有6个含盐层位(分别产于 T_3 、 J_2 、 K_2 和 E_{1-2} 中), 因此盆地地层中含有丰富的Sr。当成矿流体形成以后流经这些地层时, 溶解作用以及水岩作用而获得富放射成因Sr的特征。一般在碎屑岩地层中碳质含量较少, 水岩作用对成矿流体中的碳同位素影响不大, 而流体中的氧同位素则会发生明显的正向漂移, 类似于围岩的氧同位素。

4.3 铅同位素组成

铅同位素是研究铅锌矿床成矿物质来源最有效和最重要的手段之一。关于金顶铅锌矿铅同位素发表了大量的数据^[5,34,42,45-46]。总体上讲, 铅同位素分布范围广, 兼具壳源和幔源的特征, 但是不同作者发表的数据存在很大的差异。如果在样品的选择以

及测试方法可靠的前提下,针对同一矿床做相同分析项目而存在大的差异是难以理解的。总结前人的数据投在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中(图 5a),发现研究区大量数据点在图中呈线性分布,那么首先就得考虑是否存在系统的分析误差。Franklin *et al.*^[60]指出,引起铅同位素分析误差主要有两个原因: ^{204}Pb 本身含量低导致的测量误差;质谱测试过程中同位素质量分馏引起的误差。当出现误差时,数据点在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 中呈线性分布,前者控制的斜率 R 为所有样品 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值的比值 m ,后者控制的斜率 R 为 $115m$,当两种误差都存在时,分析数据点拟合成直线的斜率值 R 处于 m 和 $115m$ 之间。宋玉财等^[61]通过拟合不同作者的数据发现,除赵海滨^[42]的数据外,其他作者^[5,45,52,62]发表的数据及张乾^[46]发表的大部分数据的 R 值均在其各自的 m 和 $115m$ 之间,尽管不能肯定这些数据都是由分析误差所引起的,但至少是有很大疑问的,不宜进行讨论。而本研究的铅同位素数据的 R 值明显小于 m ,可以用于讨论(表 2)。

笔者在总结本研究数据和赵海滨^[42]的数据基础上,将其投在 Zartman *et al.*^[43]的 Pb 构造模式图解中(图 5a),发现金顶铅锌矿硫化物铅同位素组成相对集中,位于造山带演化线和上地壳演化线之间,可以认为是造山带 Pb 和上地壳 Pb 的混合,但由于模式图中造山带 Pb 的含义不明确,它实际上包括了高 μ 值的整合 Pb、俯冲带的壳幔混合 Pb、海底热水作用 Pb 和部分沉积与变质作用 Pb^[63]。这种混合作用通常以沉积作用、火山作用、岩浆作用、变质作用以及急速的侵蚀循环作用等方式把来源于地幔、上地壳和下地壳的 Pb 混合,形成具有均一 U/Pb 和 Th/Pb 比值的造山带 Pb。所以仅从 Pb 构造模式图解依然无法明确区分成矿物质来源。张乾等^[44]指出滇西兰坪盆地由于古生代以来经历了古特提斯和新特提斯及大陆碰撞等复杂的构造活动,滇西地区铅同位素组成超出了 Zartman 等厘定的各源区铅同位素组成的范围,并大致厘定出滇西地区上地幔 Pb 及兰坪盆地上地壳沉积岩系的铅同位素组成范围。本研究铅同位素数据集中在兰坪盆地上地壳沉积岩系区间内(图 5),说明上地壳沉积岩系可能贡献了成矿金属。另外,本次所讨论矿物铅同位素模式年龄为 181~229 Ma,平均为 207 Ma,时间上对应晚三叠世。张乾^[46]指出,由于铅同位素定年存在很大误差,尤其是像金顶这种成矿时代较新的矿床,其铅同位素模

式年龄与矿区地层间的对应关系可能并不意味着 Pb 直接来自各自所对应的地层。所以,本研究中 Pb 模式年龄的地质意义尚不清楚。而矿石的 μ 值介于 9.48~9.59 之间,平均值为 9.55,明显大于目前公认的幔源 Pb 的 μ 值(7.8~8.0),再一次佐证了成矿金属主要属壳源的结论。

从兰坪盆地成矿元素背景分布来看,Pb、Zn 元素在兰坪盆地沉积盖层中(从上三叠统至古新统云龙组)的含量较小(在上三叠统三合洞组中稍高),大致相当于克拉克值^[34]。一般来讲,这种区域的低背景特征很难为金顶铅锌矿提供充足的成矿金属。但是,据王二七等^[64]的研究结果,藏东缘新生代的陆陆碰撞作用至少使兰坪盆地东西向缩小了 500 km。根据杨友华等^[65]提供的区域地层 Pb、Zn 和 Cd 丰度资料,上三叠统三合洞组 Pb、Zn 和 Cd 的平均含量为 20、143 和 5.3 $\mu\text{g/g}$,是区内其他地层单位相同元素含量的 2~5 倍。王安建等^[3]在此基础上,取上三叠统三合洞组平均厚度 150 m 做模型计算认为,上三叠统三合洞组具有提供兰坪金顶,包括区域巨量成矿金属的巨大潜力。

而在兰坪盆地中,喜马拉雅期碱性斑岩(皂角厂岩体和卓番岩体等)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 18.352~18.897, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.616~15.772, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 38.624~39.226,数据点主要位于 Zartman *et al.* 的 Pb 构造模式图解的造山带演化线和上地壳演化线之间,并且具有高 μ 值,介于 9.48~9.75 之间,平均值为 9.54^[9],铅同位素特征类似于金顶铅锌矿(图 5)。滕彦国等^[36]研究发现这些新生代岩浆岩通常富集 Pb、Zn、Cu、Ag、Cr、Co、Ni、Cs、Sr、Ba 和 Y 等,在成因上它们具有相同的地幔源区,成岩方式主要以交代富集地幔部分熔融作用为主,但壳幔物质再循环以及地壳物质的混染对岩浆岩的形成具有重要的影响。而金顶矿床矿石化学成分除 Pb 和 Zn 外,还富含与地幔活动密切相关的 Cd、Tl、Te、Ge、Co、Ga 和 In 等稀有金属元素,其中 Cd 储量已达巨大型,Tl 储量也达数千吨。金顶矿床水系沉积物中除含 Pb、Zn、Ag 和 Cd 等标型元素外,还有高浓集的 Th(平均 53 $\mu\text{g/g}$)^[66]。Th 是典型的火成元素,联系到与金顶矿床同处于永平-兰坪南北向构造带中的喜马拉雅期碱性岩体富含 Th 等放射性元素,推测金顶矿床富 Th 可能与喜马拉雅期碱性岩浆活动有关。W 和 Mo 在地壳各圈层中的丰度变化比较大,地壳中的丰度高出地幔数倍,而地核中的丰度

又高出地壳值数倍至数十倍,表明随着地球的演化和分异,它们向富 Si 和 Al 的地壳中聚集。兰坪盆地硫化物中 W 均高出地幔值(0.1 ~ 0.3 $\mu\text{g/g}$),金顶胶黄铁矿和方铅矿接近地幔值^[42]。而 Mo 在基性岩中分布最高,又以碱性玄武岩中丰度更高,表明 Mo 是深源的元素^[67]。兰坪盆地硫化物中个别样品的 Mo 含量较高,大部分接近碱性玄武岩的丰度值(3 ~ 4 $\mu\text{g/g}$),而金顶硫化物个别样品中 Mo 含量超过 100 $\mu\text{g/g}$,暗示了成矿物质的来源可能与火成岩浆活动有关。薛春纪等^[17]指出,金顶成矿流体中富集 Mo、Re、Co 和 Ni 的特征指示了成矿作用与深部岩浆或地幔流体相关。

虽然在金顶矿区及附近至今未发现岩浆岩出露。但是卫星数字图像解译发现了反映深部岩浆等热源体客观存在的多级环形构造,在一定程度上指示了隐伏岩浆活动状态^[1,9,68]。结合兰坪盆地内喜马拉雅期幔源和壳幔源碱性岩体分布,如沿兰坪盆地中轴断裂(兰坪-思茅超壳断裂)的南部永平一带分布有始新世的水云岩体、卓番岩体和莲花山等岩体,这些岩体的成岩年龄分别为 46.5、36.7 和 38.8 Ma^[69],而赵海滨^[42]在兰坪盆地中北部的白洋厂银铜多金属矿东部,距北部金顶铅锌矿 30 km 的虎生地发现了煌斑岩脉(43 Ma),进一步佐证了兰坪盆地深部可能存在隐伏侵入体。这些已发现的岩浆活动和盆地内大多数铅锌多金属矿床的分布(包括金顶和白洋厂等大型-超大型铅锌矿床)受中轴断裂带的控制,岩浆活动与成矿在时间上趋于一致等,说明了成矿物质或成矿流体很可能有深部物质的参与。兰坪盆地内铅锌多金属矿床与喜马拉雅期岩浆活动无论在时空分布还是地球化学特征方面都显示出一定的内在联系。在喜马拉雅期造山旋回中由于欧亚板块与印度板块的挤压和碰撞作用使该地区深部地质作用异常活跃,地幔流体活动强烈,喜马拉雅期构造热事件对含矿流体的产生、运移、演化及成矿起到了重要作用,岩浆活动可能除了带来部分成矿物质外,更重要的是为成矿提供了热源^[69]。

5 结论

金顶铅锌矿至少存在两期热液矿化事件。主矿化期成矿流体主要来源于富含有机质的上三叠统三合洞组灰岩地层水,可能有深源组分的加入;矿化后期成矿流体体系大气降水。成矿流体在盆地中迁移

时与围岩(含膏岩)发生了强烈的水岩反应。成矿金属可能来源于盆地上三叠统三合洞组灰岩和喜马拉雅期岩浆岩。

诚挚感谢中国科学院地球化学研究所李晓彪工程师、骆金诚博士和范宏鹏博士在锶同位素分离和测试过程中给予的帮助,以及沈能平副研究员在锶、铅同位素应用方面的指导。

参考文献(References):

- [1] 薛春纪,陈毓川,杨建民,王登红,杨伟光,杨清标. 金顶铅锌矿床地质-地球化学[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 270-277.
Xue Chun-ji, Chen Yu-chuan, Yang Jian-min, Wang Deng-hong, Yang Wei-guang, Yang Qing-biao. Jinding Pb-Zn deposit: Geology and geochemistry[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(3): 270-277 (in Chinese with English abstract).
- [2] 曾荣. 兰坪盆地流体大规模成矿过程——以金顶和白秧坪矿床为例[D]. 西安: 长安大学, 2007.
Zeng Rong. The large scale fluid ore-forming process in the Lanping basin—Taking the Jinding and Baiyangping deposits as the examples[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王安建,曹殿华,高兰,王高尚,管焯,修群业,刘俊来. 论云南兰坪金顶超大型铅锌矿床的成因[J]. 地质学报, 2009, 83(1): 43-54.
Wang An-jian, Cao Dian-hua, Gao Lan, Wang Gao-shang, Guan Ye, Xiu Qun-ye, Liu Jun-lai. A probe into the genesis of Jinding super-large Pb-Zn ore deposit[J]. Acta Geol Sinica, 2009, 83(1): 43-54 (in Chinese with English abstract).
- [4] 施加辛,易凤煌,文启谔. 兰坪金顶铅锌矿床的岩矿特征及成因[J]. 云南地质, 1983, 2(3): 179-195.
Shi Jia-xin, Yi Feng-huang, Wen Qi-chun. The rock-ore characteristics and mineralization of Jinding lead-zinc deposit, Lanping [J]. Yunnan Geol, 1983, 2(3): 179-195 (in Chinese with English abstract).
- [5] 白嘉芬,王长怀,纳荣仙. 云南金顶铅锌矿床地质特征及成因初探[J]. 矿床地质, 1985, 5(1): 1-9.
Bai Jia-fen, Wang Chang-huai, Na Rong-xian. Geological characteristics of the Jinding lead-zinc deposit in Yunnan, with a special discussion on its genesis[J]. Mineral Deposits, 1985, 4(1): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [6] 吴淦国,吴习东. 云南金顶铅锌矿床构造演化及矿化富集规律初探[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 477-486.
Wu Gan-guo, Wu Xi-dong. A preliminary study on the tectonic evolution and mineralization regularity of the Jinding lead-zinc deposit, Yunnan Province[J]. Earth Sci, 1989, 14(5): 477-486 (in Chinese with English abstract).
- [7] 赵兴元. 云南金顶铅锌矿床成因研究[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 523-530.
Zhao Xing-yuan. On the genesis of the Jinding lead-zinc ore deposit in Yunnan[J]. Earth Sci, 1989, 14(5): 523-530 (in Chinese with English abstract).
- [8] 覃功炯,朱上庆. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测[J]. 云南地质, 1991, 10(2): 145-190.
Tan Gong-jiong, Zhu Shang-qing. Genetic model and ore pre-

- diction in Jinding Pb-Zn deposit[J]. *Yunnan Geol*, 1991, 10(2): 145-190 (in Chinese with English abstract).
- [9] 罗君烈, 杨友华, 赵准. 滇西特提斯的演化及主要金属矿床成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 157-214.
Luo Jun-lie, Yang You-hua, Zhao Zhun. Evolution of the Tethys in Western Yunnan and Mineralization for Main Metal Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 157-214 (in Chinese).
- [10] Hu Ruizhong, Turner G, Burnard P G, Zhong Hong, Ye Zaojun, Bi Xianwu. Helium and argon isotopic geochemistry of Jinding superlarge Pb-Zn deposit[J]. *Sci China (D)*, 1998, 41(4): 442-448.
- [11] 胡明安. 试论岩溶型铅锌矿床的成矿作用及其特点——以云南兰坪金顶矿床为例[J]. *地球科学*, 1989, 14(5): 531-538.
Hu Ming-an. A preliminary evaluation of the mineralization and their characteristics on the karst-type lead-zinc deposit by the exemplification of Jinding, Yunnan Province[J]. *Earth Sci*, 1989, 14(5): 531-538 (in Chinese with English abstract).
- [12] 高广立. 论金顶铅锌矿床的地质问题[J]. *地球科学*, 1989, 14(5): 467-476.
Gao Guang-li. Review of geological origin about Jinding lead-zinc ore deposit[J]. *Earth Sci*, 1989, 14(5): 467-476 (in Chinese with English abstract).
- [13] 尹汉辉, 范蔚茗, 林舸. 云南兰坪-思茅地洼盆地演化的深部因素及幔-壳复合成矿作用[J]. *大地构造与成矿学*, 1990, 14(2): 113-124.
Yin Han-hui, Fan Wei-ming, Lin Ge. The deep factor of geodepression basin evolution and the mineralization of crust-mantle mixing in Lanping-Simao, Yunnan[J]. *Geotecton Metallogen*, 1990, 14(2): 113-124 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王京彬, 李朝阳. 金顶超大型铅锌矿床 REE 地球化学研究[J]. *地球化学*, 1991, 20(4): 359-365.
Wang Jing-bin, Li Chao-yang. REE geochemistry of the Jinding super-large Pb-Zn deposit[J]. *Geochimica*, 1991, 20(4): 359-365 (in Chinese with English abstract).
- [15] Kyle J K, Li N. Jinding: A giant Tertiary sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China[J]. *SEG Newslett*, 2002 (50): 1, 9-16.
- [16] Xue Chunji, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Yang Jianmin, Yang Weiguang, Zeng Rong. Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, northwest Yunnan, China[J]. *Sci China (D)*, 2003, 46(8): 789-800.
- [17] 薛春纪, 曾荣, 高永宝, 朱和平, 赵世华, 李永强. 兰坪金顶大规模成矿的流体过程-不同矿化阶段流体包裹体微量元素约束[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 1031-1039.
Xue Chun-ji, Zeng Rong, Gao Yong-bao, Zhu He-ping, Zhao Shi-hua, Li Yong-qiang. Fluid processes of a heavy metallogenesis at Jinding, Lanping, NW-China[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(4): 1031-1039 (in Chinese with English abstract).
- [18] 薛春纪, 迟国翔, 陈毓川, 曾荣, 高永宝, Qing Hai-ruo. 西南三江兰坪盆地大规模成矿的流体动力学过程——流体包裹体和盆地流体模拟证据[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 147-157.
Xue Chun-ji, Chi Guo-xiang, Chen Yu-chuan, Zeng Rong, Gao Yong-bao, Qing Hai-ruo. Fluid dynamic processes of large-scale mineralization in the Lanping Basin, Yunnan, SW-China: Evidence from fluid inclusions and basin fluid modeling[J]. *Earth Sci Front*, 2007, 14(5): 147-157 (in Chinese with English abstract).
- [19] Brannon J C, Podosek F A, Viets J G, Leach D L, Goldhaber M, Rowan E L. Strontium isotopic constraints on the origin of ore-forming fluids of the Viburnum Trend, Southeast Missouri[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55(5): 1407-1419.
- [20] Spangenberg J, Fontbote L, Sharp Z D, Hunziker J. Carbon and oxygen isotope study of hydrothermal carbonates in the zinc-lead deposits of the San Vicente district, Central Peru: A quantitative modeling on mixing processes and CO₂ degassing[J]. *Chem Geol*, 1996, 133(1): 289-315.
- [21] Kontak D J, Kerrich R. An isotopic (C, O, Sr) study of vein gold deposits in the Meguma Terrane, Nova Scotia: Implication for source reservoirs[J]. *Econ Geol*, 1997, 92(2): 161-180.
- [22] Wareham C D, Rice C M, Boyce A J, Rogers G. S. C, O, Sr, and Pb sources in the Pliocene Silver Creek porphyry Mo system, Rico, Colorado[J]. *Econ Geol*, 1998, 93(1): 32-46.
- [23] Savard M M, Kontak D J. $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ covariations in ore-stage calcites at and around the Gays River Zn-Pb deposit (Nova Scotia, Canada): Evidence for fluid mixing[J]. *Econ Geol*, 1998, 93: 818-833.
- [24] Savard M M, Chi G, Sami T, Williams-Jones A E, Leigh K. Fluid inclusion and carbon, oxygen, and strontium isotope study of the Polaris Mississippi Valley-Type Zn-Pb deposit, Canadian Arctic Archipelago: Implications for ore genesis[J]. *Mineral Deposita*, 2000, 35(6): 495-510.
- [25] 彭建堂, 胡瑞忠. 湘中锡矿山超大型锑矿床的碳、氧同位素体系[J]. *地质论评*, 2001, 47(1): 34-41.
Peng Jian-tang, Hu Rui-zhong. Carbon and oxygen isotope systematics in the Xikuangshan giant antimony deposit, Central Hunan[J]. *Geol Rev*, 2001, 47(1): 34-41 (in Chinese with English abstract).
- [26] 彭建堂, 胡瑞忠, 邓海琳, 苏文超. 湘中锡矿山锑矿床的 Sr 同位素地球化学[J]. *地球化学*, 2001, 30(3): 248-256.
Peng Jian-tang, Hu Rui-zhong, Deng Hai-lin, Su Wen-chao. Strontium isotope geochemistry of the Xikuangshan antimony deposit, central Hunan[J]. *Geochimica*, 2001, 30(3): 248-256 (in Chinese with English abstract).
- [27] Huang Zhi-long, Li Wen-bo, Chen Jin, Han Run-sheng, Liu Cong-qiang, Xu Cheng. Carbon and oxygen isotope constraints on mantle fluid involvement in the mineralization of the Huize super-large Pb-Zn deposits, Yunnan Province, China[J]. *J Geochem Explor*, 2003, 78-79: 637-642.
- [28] Brand U. Carbon, oxygen and strontium isotopes in Paleozoic carbonate components: An evaluation of original seawater-chemistry proxies[J]. *Chem Geol*, 2004, 204(1): 23-44.
- [29] 毛景文, 赫英, 丁梯平. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧同位素证据[J]. *矿床地质*, 2002, 21(2): 121-128.
Mao Jing-wen, Hao Ying, Ding Ti-ping. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong (East Shandong) gold districts: Evidence of C, O and H isotopes[J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(2): 121-128 (in Chinese with English abstract).
- [30] 毛景文, 王志良, 李厚民, 王成玉, 陈毓川. 云南鲁甸地区二叠纪玄武岩中铜矿床的碳氧同位素对成矿过程的指示[J]. *地质论评*, 2003, 49(6): 610-615.
Mao Jing-wen, Wang Zhi-liang, Li Hou-min, Wang Cheng-yu, Chen Yu-chuan. Carbon and oxygen isotope components in

- the Permian basalt-hosted copper deposits in Ludian area, Yunnan: Implication for the mineralization process[J]. *Geol Rev*, 2003, 49(6): 610–615 (in Chinese with English abstract).
- [31] 毛景文, 李厚民, 王义天, 张长青, 王瑞廷. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 839–857.
Mao Jing-wen, Li Hou-min, Wang Yi-tian, Zhang Chang-qing, Wang Rui-ting. The relationship between mantle-derived fluid and gold ore-formation in the eastern Shandong Peninsula: Evidences from D-O-C-S isotopes[J]. *Acta Geol Sinica*, 2005, 79(6): 839–857 (in Chinese with English abstract).
- [32] 沈能平, 彭建堂, 袁顺达, 张东亮, 符亚洲, 胡瑞忠. 湖北徐家山梯矿床方解石 C、O、Sr 同位素地球化学[J]. *地球化学*, 2007, 36(5): 479–485.
Shen Neng-ping, Peng Jian-tang, Yuan Shun-da, Zhang Dong-liang, Fu Ya-zhou, Hu Rui-zhong. Carbon, oxygen and strontium isotope geochemistry of calcites from Xujiashan antimony deposit, Hubei Province[J]. *Geochimica*, 2007, 36(5): 479–485 (in Chinese with English abstract).
- [33] 袁顺达, 彭建堂, 李向前, 彭麒麟, 符亚洲, 沈能平, 张东亮. 湖南香花岭锡多金属矿床 C、O、Sr 同位素地球化学[J]. *地质学报*, 2008, 82(11): 1522–1530.
Yuan Shun-da, Peng Jian-tang, Li Xiang-qian, Peng Qi-lin, Fu Ya-zhou, Shen Neng-ping, Zhang Dong-liang. Carbon, oxygen and strontium isotope geochemistry of calcites from Xianghualing tin-polymetallic deposit, Hunan Province[J]. *Acta Geol Sinica*, 2008, 82(11): 1522–1530 (in Chinese with English abstract).
- [34] 云南地质三大队. 云南省兰坪县金顶铅锌矿详细勘探地质报告[R]. 昆明: 云南省地质与矿产局, 1984.
Third Geological Team. The Jinding Zn-Pb Deposit, Exploration Report, Lanping County, Yunnan Province[R]. Kunming: Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1984 (in Chinese).
- [35] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 徐钰. 滇西北兰坪铅锌银铜矿田含烃富 CO₂ 成矿流体及其地质意义[J]. *地质学报*, 2002, 76(2): 244–253.
Xue Chun-ji, Chen Yu-chuan, Yang Jian-min, Wang Deng-hong, Xu Yu. The CO₂-rich and hydrocarbon-bearing ore-forming fluid and their metallogenic role in the Lanping Pb-Zn-Ag-Cu orefield, northwestern Yunnan[J]. *Acta Geol Sinica*, 2002, 76(2): 244–253 (in Chinese with English abstract).
- [36] 滕彦国, 刘家铎, 张成江, 倪师军, 彭秀红. 兰坪盆地及邻区岩浆岩的微量元素地球化学研究[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(1): 40–44.
Teng Yan-guo, Liu Jia-duo, Zhang Cheng-jiang, Ni Shi-jun, Peng Xiu-hong. Trace element characteristics of magmatic rock series in Lanping basin and its neighboring areas[J]. *J Chengdu Univ Technol*, 2001, 28(1): 40–44 (in Chinese with English abstract).
- [37] McCrea J M. Isotopic chemistry of carbonates and a paleo-temperature scale[J]. *J Chem Phys*, 1950, 18: 849–857.
- [38] Qi Liang, Hu Jing, Grégoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507–513.
- [39] Chen F, Hegner E, Todt W. Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc[J]. *Int J Earth Sci*, 2000, 88(4): 791–802.
- [40] Chen F, Siebel W, Satir M, Terzioglu M N, Saka K. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone[J]. *Int J Earth Sci*, 2002, 91(3): 469–481.
- [41] 刘建明, 刘家军. 滇黔桂金三角微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. *矿物学报*, 1997, 17(4): 448–456.
Liu Jian-ming, Liu Jia-jun. Basin fluid genetic model of sediment-hosted microdisseminated gold deposits in the gold-triangle area between Guizhou, Guangxi and Yunnan[J]. *Acta Mineral Sinica*, 1997, 17(4): 448–456 (in Chinese with English abstract).
- [42] 赵海滨. 滇西兰坪盆地中北部铜多金属矿床成矿地质特征及地质条件[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
Zhao Hai-bin. Study on the characteristics and metallogenic conditions of copper-polymetallic deposits in middle-northern Lanping basin, western Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006 (in Chinese).
- [43] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics-the model[J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1/2): 135–162.
- [44] 张乾, 邵树勋, 刘家军, 刘志浩. 兰坪盆地大型矿集区多金属矿床的铅同位素组成及铅的来源[J]. *矿物学报*, 2002, 22(2): 147–154.
Zhang Qian, Shao Shu-xun, Liu Jia-jun, Liu Zhi-hao. Lead isotope composition and lead source of polymetallic deposits in the large ore-assembly district in the Lanping basin[J]. *Acta Mineral Sinica*, 2002, 22(2): 147–154 (in Chinese with English abstract).
- [45] 修群业, 王安建, 高兰, 刘俊来, 于春林, 曹殿华, 范世家, 翟云峰. 金顶超大型矿床容矿围岩时代探讨及地质意义[J]. *地质调查与研究*, 2006, 29(4): 294–302.
Xiu Qun-ye, Wang An-jian, Gao Lan, Liu Jun-lai, Yu Chun-lin, Cao Dian-hua, Fan Shi-jia, Zhai Yun-feng. Discussion on the geologic time of host rocks of Jinding super large deposit and its geological implications[J]. *Geol Surv Res*, 2006, 29(4): 294–302 (in Chinese with English abstract).
- [46] 张乾. 云南金顶超大型铅锌矿床的铅同位素组成及铅来源探讨[J]. *地质与勘探*, 1993, 29(5): 21–28.
Zhang Qian. Pb isotopic composition of Jinding super-large Pb-Zn deposit in Yunnan Province and discussion on the source of lead[J]. *Geol Prospect*, 1993, 29(5): 21–28 (in Chinese with English abstract).
- [47] Barker S L L, Bennett V C, Cox S F, Norman M D, Gagan M K. Sm-Nd, Sr, C and O isotope systematics in hydrothermal calcite-fluorite veins: Implications for fluid-rock reaction and geochronology[J]. *Chem Geol*, 2009, 268(1): 58–66.
- [48] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Econ Geol*, 1972, 67(5): 551–578.
- [49] 高永宝, 薛春纪, 曾荣. 兰坪金顶铅锌硫化物成矿中硫化氢成因[J]. *地球科学与环境学报*, 2008, 30(4): 367–372.
Gao Yong-bao, Xue Chun-ji, Zeng Rong. Forming mechanisms of H₂S in the Jinding Pb-Zn deposit, Lanping Basin, Northwest Yunnan Province[J]. *J Earth Sci Environ*, 2008, 30(4): 367–372 (in Chinese with English abstract).
- [50] 唐永永, 毕献武, 和利平, 武丽艳, 冯彩霞, 邹志超, 陶琰, 胡瑞忠. 兰坪金顶铅锌矿方解石微量元素、流体包裹体和碳-氧同位素地球化学特征研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2635–2645.
Tang Yong-yong, Bi Xian-wu, He Li-ping, Wu Li-yan, Feng Cai-xia, Zou Zhi-chao, Tao Yan, Hu Rui-zhong. Geochemical

- characteristics of trace elements, fluid inclusions and carbon-oxygen isotopes of calcites in the Jinding Zn-Pb deposit, Lanping, China[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2011, 27(9): 2635-2645 (in Chinese with English abstract).
- [51] Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry* (4th ed). [M]. New York: Springer-Verlag, 1997: 200p.
- [52] 叶庆同, 胡云中, 杨岳清. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 279p.
Ye Qing-tong, Hu Yun-zhong, Yang Yue-qing. *Regional Geochemistry Background and the Gold-Silver-Lead-Zinc Mineralization in Sanjiang Area*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 279p (in Chinese).
- [53] 温春齐, 蔡建明, 刘文周, 覃功炯, 陈式房. 金顶铅锌矿床流体包裹体地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 1995, 15(4): 78-84.
Wen Chun-qi, Cai Jian-ming, Liu Wen-zhou, Tan Gong-jiong, Chen Shi-fang. *Geochemical characteristics of fluid inclusions in the Jinding lead-zinc deposit, Yunnan, China*[J]. *J Mineral Petrol*, 1995, 15(4): 78-84 (in Chinese with English abstract).
- [54] Zheng Yong-fei. Calculation of oxygen isotope fractionation in metal oxides[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55(8): 2299-2307.
- [55] Ohmoto H. Stable isotopes geochemistry of ore deposits[J]. *Rev Mineral Geochem*, 1986, 16: 491-559.
- [56] 张理刚. 成岩成矿理论与找矿——中国主要类型矿床及花岗岩类岩石的稳定同位素地质学[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1989: 200p.
Zhang Li-gang. *Petrogenetic and Minerogentic Theories and Prospecting*[M]. Beijing: Beijing University of Industry Press, 1989: 200p (in Chinese).
- [57] Deer W A, Howie R A, Russman J. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals* [M]. New York: Longman, 1966: 511-515.
- [58] Veizer J. Strontium isotope in seawater through time[J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1989, 17: 141-167.
- [59] Korte C, Kozur H W, Bruckschen P, Veizer J. Strontium isotope evolution of Late Permian and Triassic seawater [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67(1): 47-62.
- [60] Franklin J M, Roscoe S M, Loveridge W D. *Lead Isotope Studies in Superior and Southern Provinces*[M]. Ottawa: Geological Survey of Canada, 1983, 351: 1-35.
- [61] 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 张洪瑞, 杨竹森, 田世洪, 刘英超, 王晓虎, 刘燕学, 薛传东, 王光辉, 李政. “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(3): 355-380.
Song Yu-cai, Hou Zeng-qian, Yang Tian-nan, Zhang Hong-rui, Yang Zhu-sen, Tian Shi-hong, Liu Ying-chao, Wang Xiao-hu, Liu Yan-xue, Xue Chuan-dong, Wang Guang-hui, Li Zheng. *Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: Characteristics and genetic types* [J]. *Acta Petrol Mineral*, 2011, 30(3): 355-380 (in Chinese with English abstract).
- [62] 周维全, 周全立. 兰坪铅锌矿床铅和硫同位素组成研究[J]. *地球化学*, 1992, 21(2): 141-148.
Zhou Wei-quan, Zhou Quan-li. *A study on the isotopic compositions of Pb and S in the Lanping Pb-Zn deposit, Yunnan Province*[J]. *Geochimica*, 1992, 21(2): 141-148 (in Chinese with English abstract).
- [63] 朱炳泉, 李献华, 戴樟漠. 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, 1998: 330p.
Zhu Bing-quan, Li Xian-hua, Dai Tong-mo. *The Theory and Implication of Isotope Systems in Geoscience and Discussion on Evolution of the Crust-Mantle in China*[M]. Beijing: Science Press, 1998: 330p (in Chinese).
- [64] 王二七, Burchfiel C B, 季建清. 东喜马拉雅构造结新生代地壳缩短量的估算及其地质依据[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(1): 1-9.
Wang Erqi, Burchfiel C B, Ji Jianqing. *The estimate of Cenozoic crustal shortening in eastern Himalayas and its geological evidence*[J]. *Sci China (D)*, 2001, 31(1): 1-9 (in Chinese).
- [65] 杨友华, 赵准. 试论金顶超大型铅锌矿床的成矿条件[J]. *云南地质*, 1991, 10(2): 230-240.
Yang You-hua, Zhao Zhun. *Discussion on metallogenic conditions of the Jinding super-large lead-zinc deposit*[J]. *Yunnan Geol*, 1991, 10(2): 230-240 (in Chinese with English abstract).
- [66] 陈式房, 刘仪赖, 包育秀. 德钦-下关铅锌矿带矿床类型、成矿规律研究[J]. *云南地质*, 1991, 10(2): 119-144.
Chen Shi-fang, Liu Yi-lai, Bao Yu-xiu. *Research on ore deposit types and metallogenic regularities in the lead-zinc deposit belt of Deqin-Xiaguan*[J]. *Yunnan Geol*, 1991, 10(2): 119-144 (in Chinese with English abstract).
- [67] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1999: 227p.
Mou Bao-lei. *Element Geochemistry*[M]. Beijing: Peking University Press, 1999: 227p (in Chinese).
- [68] 葛良胜, 杨嘉禾, 郭晓冬, 邹依林, 陈树新, 张晓辉. 滇西北地区(近)东西向隐伏构造带的存在及证据[J]. *云南地质*, 1999, 18(2): 155-167.
Ge Liang-sheng, Yang Jia-he, Guo Xiao-dong, Zou Yi-lin, Chen Shu-xin, Zhang Xiao-hui. *The hidden EW-structure existing in north-western Yunnan and the evidence*[J]. *Yunnan Geol*, 1999, 18(2): 155-167 (in Chinese with English abstract).
- [69] 张成江, 倪师军, 滕彦国, 彭秀红, 刘家铎. 兰坪盆地喜马拉雅期构造-岩浆活动与流体成矿的关系[J]. *矿物岩石*, 2000, 20(2): 35-39.
Zhang Cheng-jiang, Ni Shi-jun, Teng Yan-guo, Peng Xiu-hong, Liu Jia-duo. *Relationship between Himalayan tectonomagmatic movement and mineralization in Lanping basin, Yunnan Province*[J]. *J Mineral Petrol*, 2000, 20(2): 35-39 (in Chinese with English abstract).