

文章编号: 1000-4734(2016)02-0271-06

黔西北云炉河坝铅锌矿集区成矿物质来源 —S、Pb 同位素制约

张海^{1,2}, 孟昌忠¹, 齐有强², 唐永永², 金翔霖¹, 陈星¹, 冷成彪^{2*}

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局一一三地质大队, 贵州 六盘水 553001;
2. 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 550081)

摘要: 川滇黔铅锌成矿域位于扬子克拉通的西南缘, 是我国十分重要的铅锌成矿区带之一, 相关成矿物质来源认识长期存在较大争议。本文以该区研究程度较低的黔西北云炉河坝矿集区为研究对象, 对矿集区内典型的铅锌矿床(包括, 昊星、富强、顺达和狮子洞等)进行了硫、铅同位素研究, 以探讨其成矿物质的来源。硫同位素分析结果表明, 昊星矿区硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围很小 (-1.5‰~2.7‰), 且集中于零值附近, 暗示矿区硫可能主要来自于幔源岩浆硫的贡献, 另外还发现一件黄铁矿样品具有较低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (-18.1‰), 反映矿区可能还存在细菌还原硫的贡献。铅同位素数据表明, 不同矿区不同类型矿石的 Pb 同位素组成十分均一, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于 18.196~18.525, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.645~15.731, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.415~39.058, 且不同样品之间的 Pb 同位素不存在明显差别, 表明云炉河坝矿集区中的众多铅锌矿床(点)可能具有统一的铅金属来源, 且后期的氧化淋滤作用并未导致明显的铅同位素分馏。通过与区域上不同时代地层以及邻区铅锌矿床综合对比, 我们初步认为矿区铅可能主要源于该区基底岩石, 而非其赋矿地层和二叠纪玄武岩。

关键词: 铅锌矿; 硫同位素; 铅同位素; 云炉河坝; 黔西北

中图分类号: P597; P611

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.02.016

作者简介: 张海, 男, 1984年生, 高级工程师, 从事地质地球化学找矿与研究。E-mail: zhanghai01504130@163.com

Sources of the Ore-forming Material from Yunluheba Ore Field in Northwest Guizhou Province, China: Constraints from S and Pb Isotope Geochemistry

ZHANG Hai¹, MENG Chang-zhong¹, QI You-qiang², TANG Yong-yong²,
JIN Xiang-lin¹, CHEN Xing¹, LENG Cheng-biao²

(1. Guizhou Province Bureau of Geology and Mineral Resources, No.113 Geological Brigade, Liupanshui 553001, China;
2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: The Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenic domain, located on the southwest margin of Yangtze craton, is one of most important lead-zinc mineralization belts in China. However, there is still a strong debate on the source of ore-forming materials. In this paper, we focus on the Yunluheba Pb-Zn ore field (including Haoxing, Shunda, Fuqiang and Shizdong Pb-Zn deposits) in the northwest of Guizhou Province, which has not been well studied until now, and try to determine the source of ore-forming materials by analysing the sulphur and lead isotopic compositions for different sulfides. The analytical results of

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目 [黔地矿科合(2014)02号]; 中国科学院地球化学研究所“青年创新科技人才”项目; 贵州省自然科学基金项目(编号 Y5DF110000)

* 通讯作者, E-mail: lengchengbiao@vip.gyig.ac.cn

sulphur isotopes show that most sulphides from the Haoxing mining area have a narrow $\delta^{34}\text{S}$ range (-1.5‰–2.7‰), suggesting that sulphur mainly originated from the mantle. Moreover, one pyrite sample has a very low $\delta^{34}\text{S}$ value (*i.e.* -18.1‰), which could have resulted from the reduction of bacterial sulphur. Lead isotope data show that different types of ore from different deposits all has uniform Pb isotopic composition, *i.e.* $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.196\text{--}18.525$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.645\text{--}15.731$, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.415\text{--}39.058$, respectively. Furthermore, the oxidized ores generally have similar Pb isotopes with those of sulphide ores, which indicates that later oxidation leaching action did not cause lead isotope fractionation. Based on a comparison of the Pb isotopic data for different strata and deposits from Yunluheba and its adjacent regions, we proposed that the lead metal could be mainly derived from the basement rocks, rather than the wall rocks and/or Permian basalts.

Keywords: Pb-Zn deposit; sulphur isotope; lead isotope; Yunluheba; Guizhou Province

黔西北地区主要包括威宁、赫章和水城 3 个县，是贵州省重要的铅锌矿集中产区，该区位于扬子地块的西南缘，是川滇黔铅锌成矿域的重要组成部分之一，目前已发现的铅锌矿床（点）达 100 余处，但矿床规模均属于中-小型，尚未发现大型矿床。由于川滇黔铅锌成矿域在云南和四川两个省区都有大型-超大型铅锌矿床的发现，代表性矿床包括云南的会泽和毛坪，以及四川的天宝山、大梁子和银厂等。因此，该地区一直被国土资源部列为我国急需加强地质工作的重点成矿区带之一^[1]。近 20 年来，贵州省内和省外的众多地质单位在黔西北地区开展了大量的铅锌矿勘查工作，并对该区已有的铅锌矿床（点）进行了一些基础研究，以期寻找大型、乃至超大型铅锌矿床提供理论支撑。前人初步总结了该地区铅锌矿床的地质特征^[2-8]，如铅锌矿床主要赋存在不同时代的碳酸盐岩中，构造控矿明显，且具分级控矿特点，发现铅锌矿体形态较复杂，包括层状、似层状、脉状、不规则状等，且矿化具有一定分带性，围岩蚀变相对简单，主要为白云石化、黄铁矿化和铁锰碳酸盐化。

尽管前人对这些铅锌矿床的地质特征已经初步达成了一些共识，但是关于成矿物质来源的认识依然存在争议。有学者认为成矿物质主要来自碳酸盐岩地层和峨眉山玄武岩^[5]；有的认为来自各时代赋矿碳酸盐岩地层^[9]，有的认为成矿物质主要来自区域寒武纪基底^[8]；还有一些认为来自碳酸盐岩、峨眉山玄武岩、基底地层等多来源^[3,4,10]。最近，周家喜等^[10]和 Zhou 等^[11]根据矿体及围岩的常量元素、微量元素和铅、硫同位素以及稀土元素资料，认为成矿物质主要来自上部地壳和造山带各种沉积围岩地层，含矿地层、基底岩石和沉积盖层可能均提供部分成矿物质，深部来源较少。这些争议的存在，不仅制约了对铅锌成矿机制的解释和矿床模型的建立，也妨碍了找矿勘查的有效开展。

硫是热液矿床中成矿金属元素迁移和沉淀的重要矿化剂，其同位素可以有效地示踪成矿物质来源^[12]。此外，由于金属硫化物中通常含有一定量的 Pb（尤其是方铅矿），而 U、Th 含量很低，硫化物结晶以后通过衰变作用所产生的放射性成因铅的含量微乎其微，对硫化物铅同位素组成的影响可忽略不计。因此，硫化物的普通铅同位素组成也被广泛应用于矿床定年和成矿物质示踪^[13-16]。鉴于此，本文选择了该区研究程度较低的云炉河坝地区若干典型矿床进行系统采样并开展了 S、Pb 同位素研究，探讨了成矿物质的可能来源。

1 地质概况与样品采集

黔西北铅锌成矿区位于扬子地块的西南缘（图 1），区内未见变质基底岩石出露，盖层主要有石炭系、二叠系和三叠系等地层组成，在各背斜轴部有零星的震旦系、寒武系、志留系和泥盆系等地层出露^[10,17-18]。盖层岩性以灰岩和白云岩为主，页岩和砂岩次之，局部发育有膏岩层。研究区内，除了大面积分别的二叠纪峨眉山玄武岩及其同时代的侵入岩（如辉绿岩、辉长岩等），未见其他岩浆岩的出露。

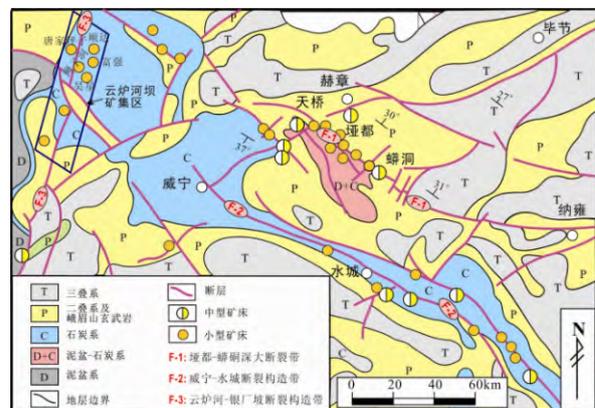


图 1 黔西北铅锌矿集区区域地质图（据 Zhou 等^[11]修改）
Fig. 1. Regional geological map of lead-zinc mineralization area in Northwestern Guizhou Province, China.

该区铅锌矿床(点)集中产于泥盆系、石炭系和二叠系的白云岩、白云质灰岩和灰岩之中。区内构造活动非常强烈,主要以 NW 向和 NNE 向的紧密褶皱和逆冲断层发育为特征,并且这些构造严格控制了区内铅锌矿床(点)的产出,一般而言,背斜轴部的逆冲断层构成了区内铅锌矿的主要导矿构造,在纵横断层交汇部位、背斜的倾伏端及其倒转地段往往是铅锌矿床的产出部位和富矿体所在位置。前人根据区域地球物理及遥感图像资料等,在研究区识别出 3 条主要的断裂褶皱构造带,分别为: 垭都—蟒洞深大断裂带、威宁—水城断裂构造带和云炉河—银厂坡断裂构造带^[2,10,19]。

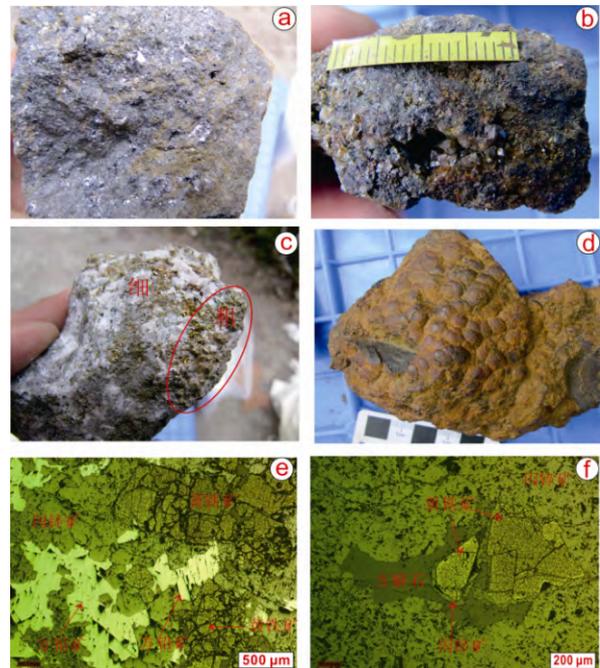
云炉河坝铅锌矿集区主要受控于云炉河-银厂坡断裂构造带(图 1),矿区位于威宁县城南西约 110 km,为云南会泽超大型铅锌矿床 NE 向铅锌成矿带的北延部分,长 90 km,宽 6~10 km。区域出露地层主要有中上泥盆统、石炭系和下二叠统^[20]。矿区断裂发育,褶皱较为简单,北东向及北西向断裂控制了矿化蚀变带及矿体的产出。赋矿层位为石炭系大埔组、黄龙组和泥盆系望城坡组,岩性以粗晶白云岩和白云质灰岩为主(图 2)。该区 NE 向断裂构造发育,主要以银厂坡—云炉河逆断层为代表,倾向 100°~150°,倾角 60°~70°,为左行高角度压扭性逆冲断层,最大垂直断距 1743 m,控制着铅锌矿带的展布^[20](图 2)。



图 2 云炉河坝矿集区富强铅锌矿床剖面图
Fig. 2. A section of Fuqiang deposit in Yunluheba ore field, Northwestern Guizhou Province.

本矿集区内铅锌矿体主要产于断裂带内及其派生的羽状断层,层间破碎带及多组断层交汇部位(图 2)。在多级构造交汇部位,尤其近于直立断层与层间破碎带交汇部位,矿体厚度大,品位高。赋矿岩性为上泥盆统望城坡组细-粗晶白云岩、灰质白云岩(图 2)。矿体主要受断裂和岩性的双重控制。围岩蚀变主要有白云石化,其次是铁锰碳酸盐化、方解石化、硅化,其中白云石化是主要的近矿围岩蚀变。

矿带内主要分布有云炉河、顺达、富强、昊星、狮子洞等矿床(点)(图 1)。矿体通常具有一定的分带性,从地表浅部到深部,矿石的自然类型依次为氧化矿(褐铁矿为主)、混合矿和原生硫化矿。硫化矿主要为方铅矿+闪锌矿+黄铁矿(图 3a-c),混合矿与氧化矿为白铅矿+铅矾+黄铁矿+闪锌矿+异极矿+褐铁矿。原生矿石主要有自形结构、半自形晶粒状结构、交代结构、包含碎裂状结构,常见块状构造、斑状、星散状构造、角砾状构造;氧化矿主要呈土状结构、皮壳状、蜂窝状、泥状构造(图 3d)。此外,硫化矿与氧化矿的产状基本一致^[1,18,20]。最近项目组通过详细的矿相学研究(另文发表),将该区的铅锌成矿作用划分出 3 个主要成矿阶段:其中,①主要为黄铁矿+闪锌矿+方解石,②为主成矿阶段,主要矿物组合为黄铁矿+闪锌矿+方铅矿+方解石±石英±白云石,③主要是对早期阶段矿物的改造、叠加作用,主要矿物组合为黄铁矿+闪锌矿+方铅矿+纤锌矿+白铅矿。通常可见晚阶段方铅矿交代早期的闪锌矿和黄铁矿(图 3e),闪锌矿在黄铁矿的边缘成矿(图 3f),以及在后期阶段发育的大颗粒黄铁矿。



a-方铅矿、闪锌矿及黄铁矿密切共生(昊星矿区); b-方解石晶洞内发育的棕褐色闪锌矿(富强矿区); c-粗粒及细粒黄铁矿发育在白云岩内(昊星); d-狮子洞矿床发育的皮壳状铁帽; e-方铅矿充填交代于闪锌矿和黄铁矿的间隙之间(昊星); f-黄铁矿边缘发育有闪锌矿,且被方解石包裹在内

图 3 黔西北云炉河坝矿区矿石手标本和镜下照片
Fig. 3. Photos (a-d) and microphotos (e-f) of ore specimens from Yunluheba ore field, Northwestern Guizhou Province.

本次研究主要对昊星、富强、顺达和狮子洞等铅锌矿床(点)进行了详细的野外地质考察,并对各矿区的典型矿石(包括原生硫化矿和次生氧化矿)进行了采样分析。

2 硫同位素

本次研究共挑选了 11 件单矿物样品进行硫同位素分析测试,其中 10 件硫化物(主要为方铅矿、闪锌矿和黄铁矿)采自昊星矿区,1 件硫酸盐(重晶石)采自唐家坪矿点泥盆纪碳酸盐岩地层之中。硫同位素分析由中国地质科学院矿产资源研究所同位素室完成,采用 MAT-251 质谱仪分析,具体过程如下:首先在双目镜下手工挑出黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和重晶石等单矿物,纯度均达到 95% 以上,在玛瑙钵中磨碎至 200 目以下,不同矿物加入不同比例的 CuO 充分混合后装入容器中,置于马弗炉内,在 1000℃ 真空条件下反应 15 min,将矿物中 S 氧化成 SO₂,收集待测,分析精度为 ±0.2‰。分析结果列于表 1。其中,重晶石的 δ³⁴S 值为 21.8‰,与同时期海水硫酸盐的硫同位素值基本吻合^[21-22],表明地层中的重晶石是通过化学沉积作用形成的,而不是热液活动的产物。

总体而言,昊星矿区硫化物的 δ³⁴S 值变化范围很大(表 1、图 4),最小值为 -18.1‰,最大值为 2.7‰,极差为 20.8‰,暗示矿区硫可能并非单一来源。这与黔西北及其邻区同类型铅锌矿床普遍具有相对较高的 δ³⁴S 值明显不同(如:麒麟厂硫化物 δ³⁴S 平均值为 9.6‰~13.6‰^[23]、杉树林 δ³⁴S 值为 5.0‰~15.8‰^[24]、天桥 δ³⁴S 值为 8.4‰~14.4‰^[11])。因此,就昊星矿区而言,硫不可能单一的来源于海水硫酸盐的无机(热化学)还原作用。其中,编号为 467-7-py(黄铁矿)的 δ³⁴S 为 -18.1‰,可能反映的是成岩阶段沉积黄铁矿的硫同位素的组成,前人研究资料表明静海环境下细菌还原硫酸盐硫时能够导致硫同位素发生最大程度的分馏^[22]。除了该件样品,其余 9 件硫化物的 δ³⁴S 值变化范围很小,介于 -1.5‰~2.7‰ 之间,且集中于零值附近(图 4),暗示矿区硫可能主要来自于幔源岩浆硫(δ³⁴S=±3‰)^[22]的贡献。

此外,对于同一个样品(手标本)而言(表 1),有的 δ³⁴S_{闪锌矿}>δ³⁴S_{方铅矿}(如 467-9),有的则相反(如 467-7),表明硫同位素分馏可能未达到平衡,或者是这些硫化物样品并非同时结晶。进一步结合上述矿相学的研究,可知矿区这些硫化物可能并非同时形成,因此无法根据其硫同位素组成估算相应的形成温度。

表 1 云炉河坝铅锌矿集区硫化物和硫酸盐的硫同位素组成

Table 1. The δ³⁴S compositions of sulfides and sulfate from Yunluheba ore field, Northwestern Guizhou Province

样品号	矿床(点)	样品名称	δ ³⁴ S _{V-CDT} /‰
TJP14-83	唐家坪子	重晶石	21.8
467-3	昊星	方铅矿	-1.5
467-9-ga	昊星	方铅矿	-1.3
467-9-sph	昊星	闪锌矿	0.5
467-6-ga	昊星	方铅矿	2.7
467-6	昊星	闪锌矿	-0.1
467-2a-ga	昊星	方铅矿	-2.0
467-2a-sph	昊星	闪锌矿	0.2
467-7-py	昊星	黄铁矿	-18.1
467-7-ga	昊星	方铅矿	0.9
467-7-sph	昊星	闪锌矿	-0.3

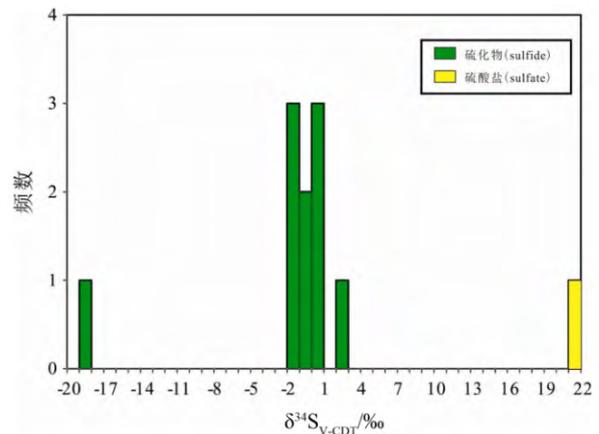


图 4 云炉河坝铅锌矿集区硫化物和硫酸盐硫同位素直方图
Fig. 4. Histogram of δ³⁴S values for Yunluheba ore field, Northwestern Guizhou Province.

3 铅同位素

本次研究共挑选出 12 件硫化物样品进行 Pb 同位素测试,其中 4 件样品来自昊星矿区硫化矿,3 件来自富强矿区(1 件硫化矿,2 件氧化矿),3 件采自顺达矿区氧化矿,2 件来自狮子洞矿区氧化矿。Pb 同位素在地质科学院宜昌地质矿产研究所 VG-261 固体质谱仪上完成测试。方铅矿样品(200 mg)溶于 HNO₃ 溶液中,最后用硅胶和 H₃PO₄ 把铅固着在铈丝上,待测。黄铁矿和闪锌矿首先用稀盐酸清除表面杂质,然后放入王水中溶解,最后转化为 HBr 色谱溶液,然后用离子交换树脂提取铅,待测,详细过程见 Bouse 等^[25]。样品监控用标准样为 NBS-981,测定结果: ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb=16.923±0.003, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb=15.467±0.003, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb=36.733±0.006,铅空白值为 1 ng,并以此对所有样品进行了误差校正。分析结果见表 2。

表 2 云炉河坝铅锌矿集区硫化物的铅同位素组成

Table 2. Lead isotopic compositions of sulfides from Yunluheba ore field, Northwestern Guizhou Province

样品号	矿物	矿床	矿石类型	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	模式年龄/Ma
467-3-ga	方铅矿	昊星	硫化矿	18.196	0.003	15.645	0.003	38.415	0.007	413
467-6-ga	方铅矿	昊星	硫化矿	18.385	0.003	15.665	0.004	38.713	0.007	312
467-6-sph	闪锌矿	昊星	硫化矿	18.41	0.003	15.666	0.003	38.757	0.005	295
HX14-25d-py	黄铁矿	昊星	硫化矿	18.414	0.003	15.67	0.003	38.769	0.006	300
FQ14-16d-ga	方铅矿	富强	硫化矿	18.431	0.004	15.676	0.005	38.804	0.009	300
FQ14-53b-py	黄铁矿	富强	氧化矿	18.439	0.002	15.676	0.003	38.838	0.007	294
FQ14-55-sph	闪锌矿	富强	氧化矿	18.439	0.003	15.686	0.003	38.87	0.003	314
SD14-10a-ga	方铅矿	顺达	氧化矿	18.441	0.004	15.692	0.004	38.876	0.008	324
SD14-9a-ga	方铅矿	顺达	氧化矿	18.459	0.006	15.703	0.002	38.906	0.008	333
SD14-11a-py	黄铁矿	顺达	氧化矿	18.496	0.004	15.713	0.004	38.938	0.008	326
SZD14-30-py	黄铁矿	狮子洞	氧化矿	18.513	0.002	15.721	0.002	39.018	0.005	329
SZD14-43d-py	黄铁矿	狮子洞	氧化矿	18.525	0.003	15.731	0.003	39.058	0.005	340

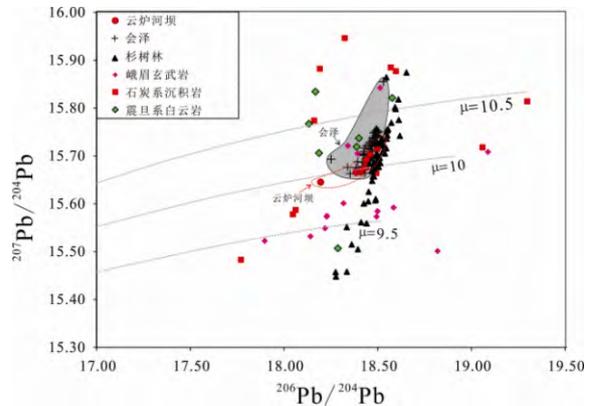
注: 模式年龄根据 Stacey 和 Kramers (1975)^[14]的方法计算获得。

结果表明(表 2), 尽管上述硫化物样品来自不同矿区、不同类型矿石, 但它们具有十分一致的 Pb 同位素组成, 其中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别介于 18.196~18.525、15.645~15.731 和 38.415~39.058 之间, 三者变化范围均很小, 且不同硫化物样品之间的 Pb 同位素组成也不存在明显的差异, 表明云炉河坝地区众多的铅锌矿床可能具有统一的铅金属来源, 并且后期的氧化淋滤作用并未导致明显的铅同位素分馏。

我们对黔西北云炉河坝铅锌矿集区及其邻区铅锌矿床铅同位素汇总结果表明, 云炉河坝矿集区铅锌矿床与邻近的会泽超大型铅锌矿床具有非常一致的铅同位素组成(图 5 阴影部分), 表明二者具有相似的铅来源。由于区域上分布的二叠纪玄武岩具有相对更小的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值, 因此不太可能成为铅源(图 5)。此外, 区域上石炭纪和震旦纪的沉积岩地层均具有非常宽泛的铅同位素组成, 据此很难判断二者是否为成矿提供了铅源。然而, 考虑到黔西北地区的铅锌矿床在不同时代的地层(震旦系-二叠系)中均有分布, 且各时期碳酸盐岩地层的铅、锌的丰度均很低(Pb 通常小于 100×10^{-6} ; Zn 小于 70×10^{-6} ^[8]), 其赋矿地层也不可能提供太多的铅、锌。因此, 我们推测云炉河坝矿集区铅锌矿床的铅可能主要来自于该区的基底岩石。

4 结论

(1) 硫同位素分析数据表明, 云炉河坝铅锌矿集区(如昊星矿区)的绝大多数硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 -1.5‰~2.7‰ 之间, 集中于零值附近, 暗示矿区硫可能主要来自于幔源岩浆硫的贡献, 另外还发现



$\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$; 云炉河坝矿区数据来自本文; 会泽矿区(阴影部分)数据主要引自文献[23,26]; 杉树林矿区数据引自文献[24,27]; 峨眉玄武岩数据引自文献[28-29]; 石炭系沉积岩数据引自文献[24,29]; 震旦系白云岩数据引自文献[29-30]

图 5 黔西北云炉河坝铅锌矿集区及其邻区铅锌矿床 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 协变图

Fig. 5. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram for Pb-Zn deposits from Yunluheba ore field and its adjacent area.

一件黄铁矿样品具有很低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(-18.1‰), 反映矿区可能还存在细菌还原硫的贡献。

(2) 云炉河坝铅锌矿集区中不同矿床、不同类型矿石(硫化矿、氧化矿)的 Pb 同位素组成十分均一, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于 18.196~18.525, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.645~15.731, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.415~39.058, 且不同样品之间不存在明显的 Pb 同位素分异, 表明它们可能具有统一的铅金属来源, 且后期的氧化淋滤作用并未导致明显的铅同位素分馏。通过与区域上不同时代地层以及邻区铅锌矿床综合对比, 我们初步认为矿区铅可能主要源于该区基底岩石, 而非赋矿碳酸盐岩地层和二叠纪玄武岩。

参 考 文 献:

- [1] 廖震文. 地物化综合找矿方法的一次成功尝试—贵州银厂坡银铅锌矿床深部矿体综合找矿预测及验证[J]. 地质与勘探, 2006, 42(1): 59-63.
- [2] 陈国勇, 邹建波, 谭华, 范玉梅. 黔西北地区铅锌矿成矿规律探讨[J]. 贵州地质, 2008, 25(2): 86-94.
- [3] 顾尚义. 黔西北铅锌矿稀土元素组成特征—兼论黔西北地区铅锌矿成矿与峨眉山玄武岩的关系[J]. 贵州地质, 2006, 23(4): 274-277.
- [4] 顾尚义. 黔西北地区铅锌矿硫同位素特征研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2007, 36(1): 8-11.
- [5] 黄智龙, 陈进, 刘从强, 韩润生, 李文博, 赵德顺, 高德荣, 冯志宏. 峨眉山玄武岩与铅锌矿床成矿关系初探—以云南会泽铅锌矿床为例[J]. 矿物学报, 2001, 21(4): 681-688.
- [6] 刘幼平. 黔西北地区铅锌矿成矿规律及找矿模式初探[J]. 贵州地质, 2002, 19(3): 169-174.
- [7] 王华云. 贵州铅锌矿的地球化学特征[J]. 贵州地质, 1993, 10(4): 272-290.
- [8] 郑传仑. 黔西北铅锌矿的矿质来源[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1994, 14(2): 113-124.
- [9] 廖文. 滇东-黔西铅锌金属区硫、铅同位素组成特征与成矿模式探讨[J]. 地质与勘探, 1984, 20(1): 1-6.
- [10] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 金中国, 李晓彪, 丁伟, 谷静. 黔西北赫章天桥铅锌矿床成矿物质来源: S, Pb 同位素和 REE 制约[J]. 地质论评, 2010, 56(4): 513-524.
- [11] Zhou J, Huang Z, Zhou M, Li X, Jin Z. Constraints of C-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53: 77-92.
- [12] Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1986, 16(1): 491-559.
- [13] Cumming G, Richards J. Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 28(2): 155-171.
- [14] Stacey J S, Rammers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 26(2): 207-221.
- [15] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1): 135-162.
- [16] Zartman R E, Haines S M. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs—a case for bi-directional transport [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(5): 1327-1339.
- [17] 韩润生, 刘从强, 黄智龙, 李元, 陈进. 云南会泽铅锌矿床构造控矿及断裂构造岩稀土元素组成特征[J]. 矿物岩石, 2000, 21(4): 11-18.
- [18] 刘幼平, 杭家华, 张伦尉, 曾道国. 黔西北铅锌矿集区成矿条件及找矿潜力探讨[J]. 矿产与地质, 2004, 24(6): 545-549.
- [19] 金中国. 黔西北地区铅锌矿控矿因素, 成矿规律与找矿预测[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [20] 王佳武. 贵州省威宁县云炉河坝铅锌矿床地质特征[J]. 贵州地质, 2004, 21(2): 90-93.
- [21] Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. Springer Science & Business Media, 2008.
- [22] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [23] 李文博, 黄智龙, 张冠. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb、S、C、H、O、Sr 同位素制约[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2567-2580.
- [24] Zhou J X, Huang Z L, Lv Z C, Zhu X K, Gao J G, Mirnejad H. Geology, isotope geochemistry and ore genesis of the Shanshulin carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 63: 209-225.
- [25] Bouse R M, Ruiz J, Titley S R, Tosdal R M, Wooden J L. Lead isotope compositions of Late Cretaceous and early Tertiary igneous rocks and sulfide minerals in Arizona; implications for the sources of plutons and metals in porphyry copper deposits [J]. *Economic Geology*, 1999, 94(2): 211-244.
- [26] 黄智龙, 陈进, 韩润生, 李文博, 刘从强, 张振亮, 马云, 高德荣, 杨海林. 云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因: 兼论峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [27] 张启厚, 毛健全, 顾尚义. 水城赫章铅锌矿成矿的金属物源研究[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 1998, 27(6): 26-34.
- [28] 许连忠. 滇黔相邻地区峨眉山玄武岩地球化学特征及其成自然铜矿作用[D]. 贵阳: 中国科学院研究生院, 2006.
- [29] 李厚民, 毛景文, 张长青, 许虹, 陈毓川, 王登红. 滇黔交界地区玄武岩铜矿同位素地球化学特征[J]. 矿床地质, 2004, 23(2): 232-240.
- [30] Zhou C, Wei C, Guo J, Li C. The Source of Metals in the Qilinchang Zn-Pb Deposit, Northeastern Yunnan, China: Pb-Sr Isotope Constraints [J]. *Economic Geology*, 2001, 96(3): 583-598.