

云南芦子园铅锌矿床地球化学、流体包裹体及稳定同位素特征

夏庆霖^{1,2}, 陈永清³, 卢映祥⁴, 蒋成兴⁴, 刘红光⁵, 吕志成³

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室(中国地质大学), 湖北武汉 430074

2. 国土资源部资源定量评价及信息工程重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

4. 云南省地质调查院, 云南昆明 650011

5. 中国地质图书馆, 北京 100083

摘要: 云南省保山—镇康古生代沉积盆地的上寒武统碳酸盐岩中发育有脉状铅锌矿体, 它们均受地层和构造的双重控制。芦子园铅锌矿是该区此类型规模最大的一个矿床, 矿体赋存于沙河厂组的大理岩及大理岩化灰岩中, 其原生矿金属矿物组合为: 闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿和磁铁矿。围岩蚀变有矽卡岩化、绿泥石化、硅化、黄铁矿化和大理岩化等。流体包裹体研究表明, 该地区铅锌矿化经历中低温(160~280℃)和中高温(280~420℃)2个主要矿化阶段。芦子园铅锌矿的硫、铅同位素组成具有变化范围窄、相对均一的特点($\delta^{34}\text{S}$) = $9.23 \times 10^{-3} \sim 10.17 \times 10^{-3}$; $\omega(^{206}\text{Pb})/\omega(^{204}\text{Pb}) = 18.224 \sim 18.338$, $\omega(^{207}\text{Pb})/\omega(^{204}\text{Pb}) = 15.715 \sim 15.849$, $\omega(^{208}\text{Pb})/\omega(^{204}\text{Pb}) = 38.381 \sim 38.874$), 其矿石硫与铅同位素都反映了成矿过程曾受到岩浆活动的影响。研究表明: 镇康地区铅锌矿为与上寒武统局部层位和隐伏岩体有关的热液型铅锌多金属矿床。

关键词: 碳酸盐岩中赋存的铅锌矿床; 地球化学; 流体包裹体; 硫、铅同位素; 云南镇康。

中图分类号: P59

文章编号: 1000-2383(2005)02-0177-10

收稿日期: 2004-06-23

Geochemistry, Fluid Inclusion, and Stable Isotope Studies of Luziyuan Pb-Zn Deposit in Yunnan Province, Southwestern China

XIA Qing-lin^{1,2}, CHEN Yong-qing³, LU Ying-xiang⁴, JIANG Cheng-xing⁴, LIU Hong-guang⁵, LÜ Zhi-cheng³

1. State Key Laboratory of Geo-Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. The Key Laboratory of Resources Quantitative Assessment & Information Engineering, Ministry of Land and Resources, Wuhan 430074, China

3. Development & Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

4. Geological Survey of Yunnan Province, Kunming 650011, China

5. China Library of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Carbonate-hosted lead-zinc sulfide veins in the Upper Cambrian are located in the southern area of the Baoshan-Zhenkang Paleozoic sedimentary basin, Yunnan Province. Geologic evidence suggests that controls on the deposit are both stratigraphic and structural. The Luziyuan Pb-Zn deposit, hosted by marble and marbleization-limestone of the Shahechang Group, is the largest in this area. Mineralization consists of galena, sphalerite, chalcopyrite, pyrite, and magnetite. Alteration consists of skarnization, chloritization, silicification, pyritization, and marbleization. Fluid inclusion studies indicate that the mineralization has two main stages: the lower-middle temperature stage (homogenization temperatures of 160 °C to 280 °C) and the upper-middle temperature stage (homogenization temperatures of 280 °C to 420 °C). Sulfide has a very uni-

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目: “十五”国家科技攻关课题(2003BA612A-02); 国土资源大调查项目(No. 200110200009)。

作者简介: 夏庆霖(1968—), 男, 副教授, 在职攻读博士学位, 主要从事矿产资源定量评价研究。

form S, Pb isotope composition, with $\delta(^{34}\text{S}) = (9.23 - 10.17) \times 10^{-3}$, $\omega(^{206}\text{Pb})/\omega(^{204}\text{Pb}) = 18.224 - 18.338$, $\omega(^{207}\text{Pb})/\omega(^{204}\text{Pb}) = 15.715 - 15.849$, and $\omega(^{208}\text{Pb})/\omega(^{204}\text{Pb}) = 38.381 - 38.874$. Both the S and Pb isotopes of ore indicate the partial role of magma hydrothermal fluid in mineralization. The carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Zhenkang area are considered to be strata-bound hydrothermal deposits that formed in favorable tectonic areas in the basis of ore source beds, are associated with magma activities, and have the features of multi-epochs and multi-stages as well as multi-sources in mineralization.

Key words: carbonate-hosted Pb-Zn deposits; geochemistry; fluid inclusion; stable isotope (S, Pb); Zhenkang area of Yunnan Province.

赋存在碳酸盐地层中的铅锌多金属工业矿化因其储量大、发育广泛且成因复杂而倍受中外地质学家的关注 (Robinson and Godwin, 1995; Reid *et al.*, 1997; Anderson *et al.*, 1998; Gomez-Fernandez *et al.*, 2000; Banks *et al.*, 2002; Hitzman *et al.*, 2002; Wouter *et al.*, 2003), 我国西南、华南、东北及新疆等地区均有关于碳酸盐岩中铅锌矿床的报道 (王云华, 1996; 李连举等, 1999; Schneider *et al.*, 2002; 王书来等, 2002; 谢世业等, 2004; 陈江峰等, 2004). 赋存于晚寒武世碳酸盐地层中的芦子园铅锌多金属矿位于保山—镇康地块南部, 属沉积改造型矿床 (邓必方, 1995), 经过近年来的地勘工作, 确定其储量已达到大型矿床的规模. 保山—镇康地块是西南“三江”成矿带的重要组成部分, 呈北窄南宽的楔状体, 其古生界广泛发育, 形成了一个古生代沉积盆地. 镇康复背斜位于该盆地南缘, 背斜轴线主要呈北北东向, 轴面基本直立. 芦子园地区形成了次一级的背斜, 地层倒转, 轴面倾向北西. 复背斜核部地层为上寒武统沙河厂组、保山组, 主要分布于镇康县忙丙小河边、乌木兰一带; 翼部地层自复背斜内部向外依次排列为: 奥陶系、志留系泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系等. 地层产状变化较大, 总体呈西翼陡、东翼缓的不对称状. 核部北东向断裂构造发育并有北西向配套断裂组分布. 复背斜核部倾没端和两翼以及一向斜之间的背向斜转换部位往往是矿体赋存的有利空间. 镇康复背斜在研究区内向南倾伏并与北东向的区域南汀河断裂带发生交汇, 是一个构造变形、成矿热液活动较为集中的地区, 分布有芦子园、放羊山、水头山、草坝寨、枇杷水、岩脚山铅锌矿床和矿点, 以及小干沟金矿、乌木兰锡矿等 (图 1).

1 矿区地质

1.1 地层

矿区出露地层为寒武系保山组第一段, 沙河厂

组第二、三段, 以及奥陶系—三叠系碳酸盐岩和碎屑岩. 芦子园铅锌矿即赋存于寒武系沙河厂组第二、三段呈互层状产出的大理岩 (大理岩化灰岩) 中 (图 1).

其中, 沙河厂组第二段 (C_3^2) 分布在矿区中部呈北东向展布, 根据岩性特征可划分为 3 个岩性层: 下部岩性层为灰绿色绿泥石英片岩、板岩夹大理岩; 中部岩性层为灰白色薄层状大理岩夹绿泥石英片岩; 上部岩性层为灰白色中厚层状大理岩. 沙河厂组第三段 (C_3^3) 分布在矿区中部和东南侧, 呈北东向展布. 根据岩性特征可划分 2 个岩性层: 下部岩性层为板岩夹大理岩、绿泥石英片岩; 上部岩性层为灰白色、深灰色薄层—中厚层大理岩. 保山组第一段 (C_3^1) 分布在矿区边部, 呈北东向展布, 为深灰色粉砂质板岩夹变质石英砂岩.

1.2 构造

矿区构造为一轴面向西倾斜的次级倒转背斜构造, 沿背斜核部发育北东向和北西向 2 组断裂, 其中, 北东向张扭性断层和层间破碎带是矿体的主要赋存部位. 北东向断裂沿背斜轴部发育, 属张扭性断裂, 断层属先压后张扭, 主断面旁侧常产生了一系列的纵张裂隙和层间破碎带, 矿体产于这些裂隙和层间破碎带中, 并控制了矿体的产出形态和产状规模, 为本区的导矿和储矿断裂. 北西向断裂具张扭转压扭性质, 属成矿期后断裂, 对矿体起破坏和改造作用.

1.3 岩浆岩

矿区内岩浆岩不发育, 仅见辉绿岩脉出露, 但从区域重力、航磁特征、遥感解译及地表零星砂卡岩露头推断, 区内有隐伏花岗岩体存在 (赵志芳等, 2002). 特别是在矿区深部岩石砂卡岩化作用增强并有较多钾长石脉出现, 也说明深部可能有中、酸性隐伏岩体存在. 辉绿岩脉多沿断裂带呈北东或北西向分布, 脉体长 200~300 余 m, 宽 10~40 m 不等. 岩石具辉绿结构, 矿物成分为斜长石、辉石、少量磁铁矿、石英. 岩脉常具理化现象以及硅化、黄铁矿化、绿帘石化和绿泥石化等蚀变, 局部具铅锌铜矿化.

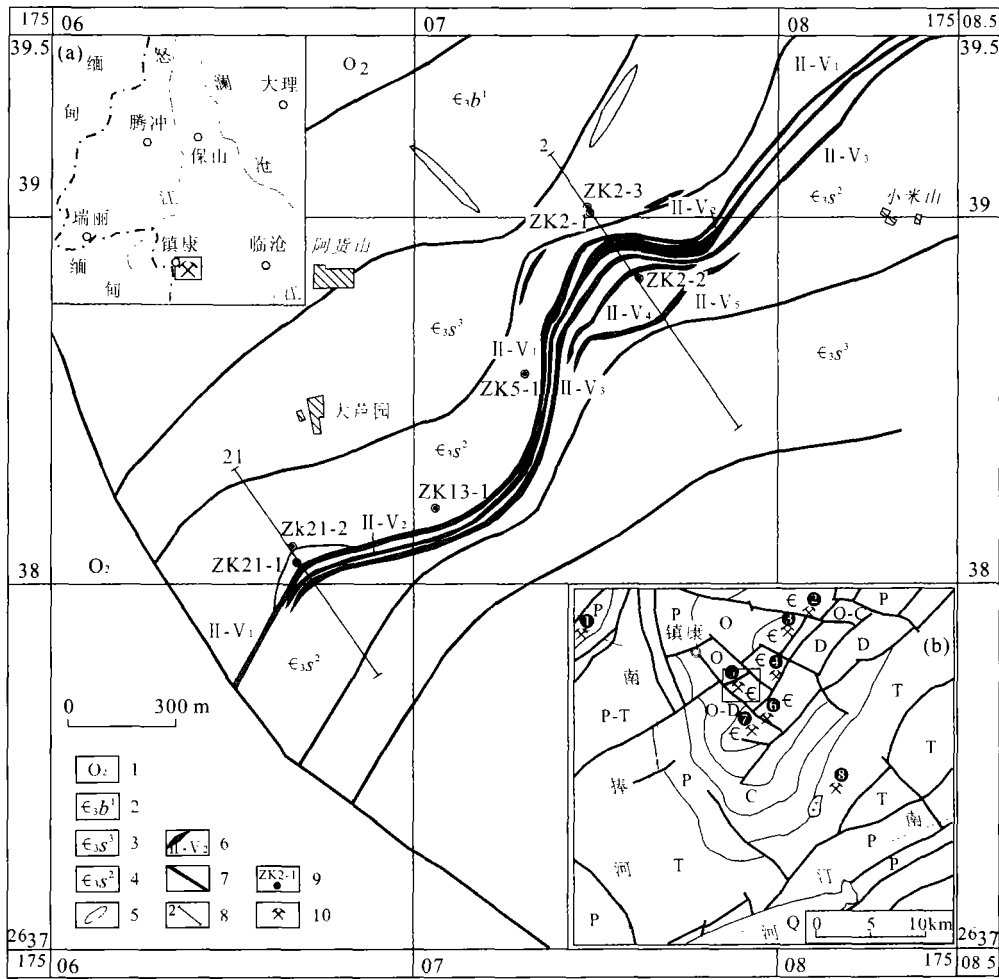


图 1 镇康地区区域地质简图及芦子园铅锌矿床 II 矿带地质图(据云南地调院第四地质调查所修编)

Fig. 1 Geological sketch map of Zhenkang area and geological map of No. 2 ore belt of Luziyuan lead-zinc deposit

a. 研究区位置示意图; b. 镇康地区区域地质简图; 1. 中奥陶统; 2. 上寒武统保山组第一段; 3. 上寒武统沙河厂组第三段; 4. 上寒武统沙河厂组第二段; 5. 辉绿岩脉; 6. 矿体及编号; 7. 断裂; 8. 勘探线及编号; 9. 钻孔及编号; 10. 矿床或矿点: ①. 岩脚山铅锌矿; ②. 枇杷水铅锌矿; ③. 草坝寨铅锌矿; ④. 放羊山铅锌矿; ⑤. 芦子园铅锌矿; ⑥. 水头山铅锌矿; ⑦. 乌兰兰锡矿; ⑧. 小干沟金矿

2 矿床地质

2.1 矿体特征

芦子园铅锌矿床位于保山—镇康地块南部边缘的镇康背斜南倾伏端,分为南、北两段,北段为小河边矿段,南段为芦子园矿段。矿体定位受与次级背斜面轴基本平行的韧性剪切带和断裂破碎带控制,断层产状由陡变缓处往往为矿体的厚大部位。芦子园矿段铅锌矿体产于寒武系沙河厂组二、三段之大理岩、板岩、片岩的层间破碎带及断层破碎带中,呈脉状、似层状产出,并成群带集中分布。按矿体形态、赋存层位、分布位置将各矿体分为 I、II、III 3 个矿带。

其中, I 号矿带位于矿区北西部,呈北东向延伸,倾向 325°~356°, 倾角 50°~70°。矿化带长约

500 m,宽 8~40 m,由 8 个矿体组成,单个矿体一般长 50~100 m,厚 1~2 m。矿体平均品位 Pb 0.78%~1.96%、Zn 1.30%~7.00%。该矿带各矿体规模较小,品位低,是矿区次要矿化带。II 号矿带位于矿区中部,矿体总体走向为北东,已控制矿化带总长约 2 300 m,倾向北西,平均倾角 62°(图 1)。目前圈定规模较大的铅锌矿体 5 条(II-V₁~II-V₅),控制矿体斜深达 370 m,各矿体特征见表 1。矿脉产状斜切层理与片理产状一致,这表明矿化在一定程度上受片理化带控制。III 号矿带位于矿区之南东部,呈北东向展布,长约 500 m,矿化带宽度 150 m,矿体赋存于寒武系沙河厂组第三段中上部之结晶灰岩、大理岩中,由 25 个小矿体组成,单矿体呈脉状产出,一般长约 100 m,厚 1~3 m。倾向北西,

表 1 芦子园铅锌矿 II 号矿带矿体特征

Table 1 Characteristics of ore bodies in No. 2 ore belt of Luziyuan Pb-Zn deposit

矿体号	形态	控制长度/m	产状/(°)	控制斜深/m	水平厚度/m	单工程平均品位/%	矿石类型
II-V ₁	似层状	2 250	323∠60	130	0.82~30.81 平均 7.87	Pb:0.61~3.64 Zn:1.71~8.46	地表以氧化矿为主
II-V ₂	似层状	3 050	322∠61	300	0.70~21.36 平均 6.94	Pb:0.92~5.24 Zn:1.62~5.43	地表以氧化矿为主
II-V ₃	似层状	3 350	328∠61	370	0.76~26.22 平均 7.37	Pb:0.70~2.76 Zn:2.14~13.15	地表以氧化矿为主
II-V ₄	脉状	380	332∠55		3.46~9.00 平均 5.49	Pb:0.89~1.59 Zn:1.73~2.43	地表为氧化矿
II-V ₅	脉状	820	321∠47	115	1.49~9.59 平均 5.08	Pb:0.94~2.41 Zn:4.15~10.37	地表为氧化矿

倾角 45°~60°。单矿体平均品位 Pb 0.65%~2.63%, Zn 1.54%~3.58%, 规模较小。矿石类型为氧化铅锌矿石。矿脉产状斜切层理与片理产状一致。各矿体顶、底板岩石主要为寒武系沙河厂组大理岩及板岩、片岩;矿体与大理岩类围岩之间的界线较明显。由于地表氧化作用强烈,矿体与板岩及片岩围岩界线必须通过化学分析圈定。

2.2 矿石特征

2.2.1 矿石类型及结构、构造 本区矿石为硫化铅锌矿石和氧化铅锌矿石 2 类,局部地段矿石富铜,为铅锌铜矿石。矿石具半自形—他形晶粒状结构、胶状结构,浸染状、次块状、条带状构造及土状、皮壳状、角砾状、多孔状及蜂窝状构造。

2.2.2 矿石成分 原生矿金属矿物组合主要为:闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿;氧化矿物为异极矿、菱锌矿、水锌矿、白铅矿、铅矾、孔雀石、褐铁矿等。脉石矿物为方解石、石英、绿泥石、阳起石、透辉石、金云母、滑石、蛇纹石等。

矿石中主要有用组份以锌为主,次为铅,伴生有益组份为银、铜、镓,多数有害元素含量在检出限之下。

2.3 围岩蚀变

本区近矿围岩蚀变主要有矽卡岩化、绿泥石化、硅化、黄铁矿化、大理岩化,局部地段有钾化。

(1) 矽卡岩化是区内普遍的蚀变类型,主要表现为在矿体附近及沿构造、热液活动强烈的地方碳酸盐岩及含钙质砂泥岩发生热液蚀变,形成以阳起石为主要矿物的矽卡岩及矽卡岩化岩石,矽卡岩化与矿化关系较密切。(2) 绿泥石化,在矿体中均可见绿泥石化,绿泥石化的强弱与矿化成正比关系。(3) 硅化主要见于矿化大理岩及矿体中,可见方铅矿晶体镶嵌于石英晶体中,与铅锌矿化关系密切。(4) 黄铁

矿化见于矿体及矿体顶底板及近矿围岩中,黄铁矿含量往往有明显的增加,黄铁矿化发育地段往往指示有矿体或矿化体的存在,与成矿关系密切。(5) 大理岩化。矿区各类灰岩均有不同程度大理岩化,在矿体周围更加突出,矿体中多数地段见不规则状铅锌矿化大理岩团块,大理岩化与铅锌成矿关系比较密切。

3 矿床地球化学

3.1 矿石元素地球化学特征

从芦子园矿区系统采集了各类矿石样品 37 件(表 2),在湖北省地勘局岩矿测试中心定量测试了 Au(C-OES); Ag, B, Sn(OES); As, Sb, Bi(AF); Cu, Zn, Co, Ni, V(ICP-AES); Pb, Cr, SiO₂(XRE); W, Mo(OP); F(离子电极)等 18 个元素。从表 2 可以看出,芦子园铅锌多金属矿床(37 件样品)Pb 品位为 0.34%、Zn 品位为 3.42%、Cu 品位为 0.33%、Ag 品位为 3.04 g/t,与保山地块上寒武统地层平均含量(由本次研究从矿区外围所采集的 48 件上寒武统核桃坪组、沙河厂组和保山组地层基岩样品计算得来)相比,分别富集了 281.3 倍、413.7 倍、128.6 倍和 60.8 倍,其元素浓集序列(K≥1.2)为 Zn→Pb→Cu→Ag→Sb→Au→Bi→F→W→As→Co;其中,硫化铅锌铜矿石(7 件样品)Pb 品位为 1.25%、Zn 品位为 4.48%、Cu 品位为 0.62%、Ag 品位为 8.03 g/t,其元素浓集序列(K≥1.2)为 Pb→Zn→Cu→Ag→Sb→Au→As→F→W→Co→Bi;硫化铅锌矿石(18 件样品)Pb 品位为 0.17%、Zn 品位为 4.05%、Cu 品位为 0.04%、Ag 品位为 1.56 g/t,其元素浓集序列(K≥1.2)为 Zn→Pb→Ag→Bi→F→W→Au→Cu→As→Co→Sb→Mo;大理岩型矿石(8 件样品)

表 2 芦子园铅锌矿矿石微量元素

Table 2 Trace elements concentration in ores of Luziyuan Pb-Zn deposits

参数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Sn	Mo	As	
I	X	41.28	3.04	3 252.76	3 386.32	34 157.62	29.03	1.40	0.64	74.49
I	S	101.11	4.41	9 626.78	8 042.20	31 296.02	56.63	1.14	1.31	100.66
I	K	28.27	60.77	128.62	281.26	523.57	11.25	0.33	1.74	9.80
II	X	27.99	8.03	6 228.57	12 528.57	44 771.43	14.53	1.94	0.2	139.9
II	S	26.13	6.04	3 258.18	12 297.52	32 223.27	5.85	1.05	0.0	168.31
II	K	19.17	160.65	246.29	1 040.58	686.26	5.63	0.46	0.54	18.41
III	X	26.03	1.56	426.83	1 728.22	40 472.67	48.02	1.05	0.96	96.19
III	S	32.82	2.51	622.51	6 317.14	33 749.35	76.46	0.28	1.82	203.46
III	K	17.83	31.10	16.88	143.54	620.37	18.61	0.25	2.59	12.66
IV	X	10.58	0.90	99.00	341.63	16 022.63	3.9	1.0	0.49	56.65
IV	S	16.11	1.25	153.94	600.20	20 379.10	4.26	0.1	0.59	65.93
IV	K	7.24	17.93	3.91	28.37	245.60	1.51	0.24	1.32	7.45
V	X	83	5.94	28 808.50	1 700	45 550	3.2	6.9	0.21	72.65
V	S	49.5	6.44	39 868.80	2 234.46	14 354.27	3.54	4.88	0.15	81.25
V	K	56.85	118.86	1 139.13	141.20	698.19	1.24	1.63	0.57	9.56
VI		1.46	0.05	25.29	12.04	65.24	2.58	4.24	0.37	7.6
参数	Sb	Bi	F	B	Cr	Ni	Co	V	SiO ₂	
I	X	60.65	12.47	13 706.95	2.22	12.57	23.11	74.97	30.78	28.70
I	S	235.87	31.81	18 518.23	0.94	10.08	5.24	55.20	13.88	11.65
I	K	30.48	16.63	16.18	0.04	0.24	0.84	6.45	0.46	0.81
II	X	259.84	1.15	5 173.43	2.79	22.64	25.83	34.07	36.6	32.7
II	S	524.25	1.69	4 718.69	1.39	14.18	4.65	25.07	11.36	8.88
II	K	130.57	1.54	6.11	0.04	0.43	0.94	2.93	0.55	0.92
III	X	14.64	21.02	21 615.39	2.0	11.1	25.11	107.78	29.51	29.47
III	S	20.14	43.05	22 796.96	0.47	8.21	8.80	66.47	12.14	6.54
III	K	7.36	28.03	25.51	0.03	0.21	0.91	9.27	0.45	0.83
IV	X	10.53	7.17	5 998.25	2.24	7.83	21.28	54.05	28.31	17.06
IV	S	9.60	17.64	9 869.30	0.67	4.98	6.98	47.70	18.58	16.54
IV	K	5.29	9.56	7.08	0.04	0.15	0.77	4.65	0.43	0.48
V	X	60.75	7.25	14 887	—	8.8	23.2	90.7	36	40.38
V	S	49.99	4.45	17 492.41	—	6.22	3.68	13.58	26.87	8.174
V	K	30.53	9.67	17.57	—	0.17	0.84	7.8	0.54	1.13
VI		1.99	0.75	847.33	62.92	52.70	27.52	11.63	66.20	35.58

注: Au 单位为 10⁻⁹, SiO₂ 单位为%, 其余元素为 10⁻⁶; X 为均值, S 为标准差, K 为浓集系数; I. 芦子园矿床(37); II. 大理岩型条带状硫化铅锌铜矿石(7); III. 大理岩型条带状硫化铅锌矿石(18); IV. 大理岩型浸染状矿石(8); V. 石英脉型矿石(2); VI. 保山地块上寒武统.

Pb 品位为 0.03%、Zn 品位为 1.60%、Cu 品位为 0.01%、Ag 品位为 0.90 g/t, 其元素浓集序列(K ≥ 1.2)为 Zn→Pb→Ag→Bi→As→Au→F→Sb→Co→Cu→W→Mo; 石英脉型矿石(2 件样品) Pb 品位为 0.17%、Zn 品位为 4.56%、Cu 品位为 2.88%、Ag 品位为 5.94 g/t, 其元素浓集序列(K ≥ 1.2)为 Cu→Zn→Pb→Ag→Au→Sb→F→Bi→As→Co→Sn→W.

3.2 蚀变矿化地球化学特征

为进一步研究蚀变与矿化的关系, 按采样间距为 10 m 分别对芦子园铅锌矿区一主要穿脉平硐系统采集岩矿样品 87 件, 对铅孔采集岩矿样品 45 件, 并定量测试了 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、Sn、Mo、As、

Sb、Bi、F、B、Cr、Ni、Co、V、K₂O、Na₂O、SiO₂ 等 20 个元素. 其主穿脉平硐地质地球化学剖面图(图 2)表明, 芦子园矿区构造对成矿的控制明显, 且存在 2 种类型的铅锌矿化——即与大理岩有关的矿化和与基性岩有关的矿化. 在矿体、矿化大理岩、矿化基性岩脉和构造片岩出露的部位均对应于 Pb、Zn、Cu、Ag、Au 等成矿元素含量变化曲线的峰值, 在角砾状大理岩出露部位也出现 Pb、Zn、W、B、As、K₂O、SiO₂ 等元素含量的高值区. 利用该剖面元素分析数据进行了因子分析结果表明以下 5 种元素组合: F₁: Ag—Cu—W—As—Sb—Bi—F—Co; F₂: Mo—Cr—Ni—V—Na—Si; F₃: Sn—B—K; F₄: Au—Zn—Co;

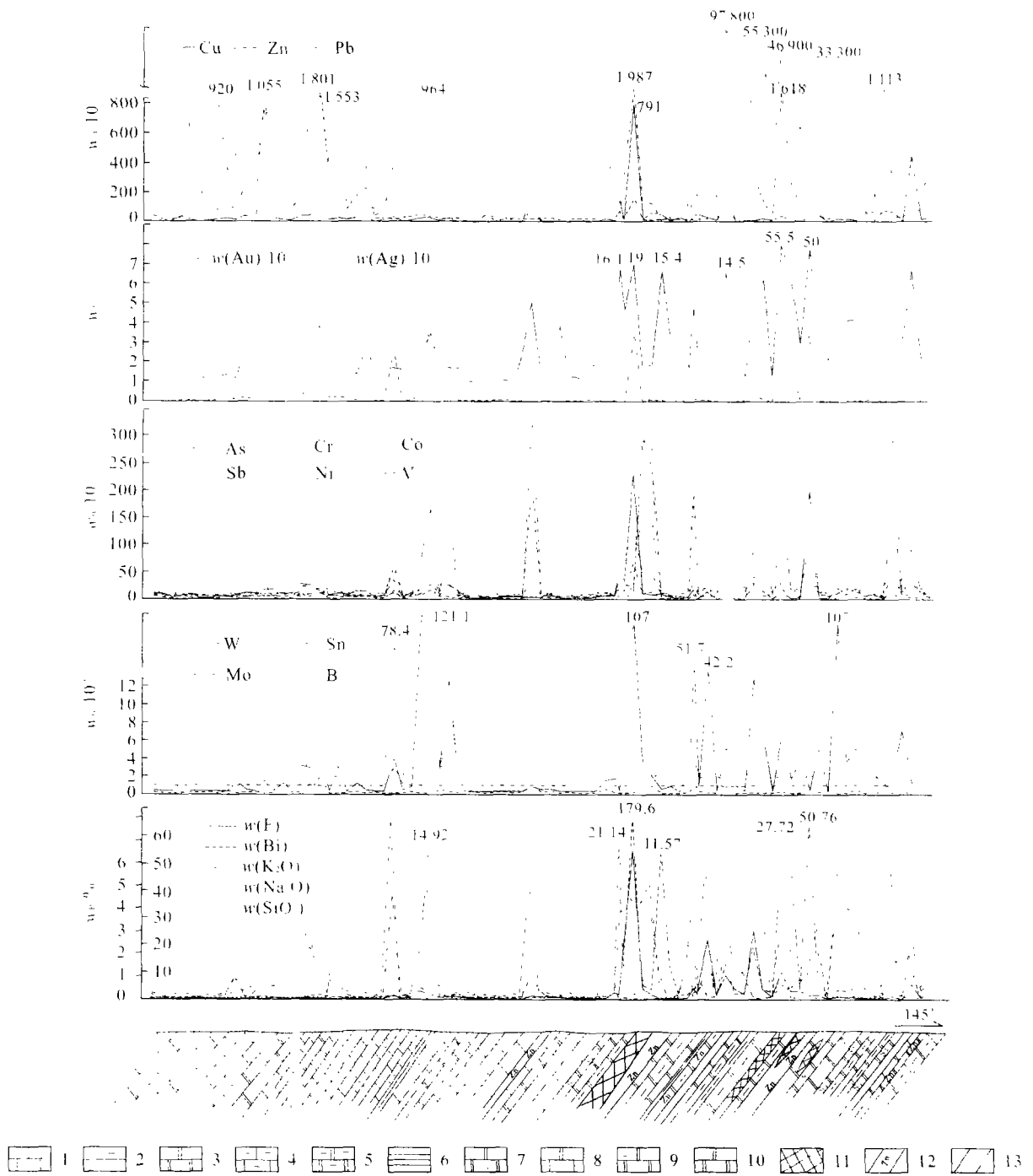


图 2 芦子园铅锌矿平硐地质及地球化学剖面

Fig. 2 Geological and geochemical section in the main gallery of Luziyuan Pb-Zn deposit

1. 灰岩; 2. 构造片岩; 3. 大理岩; 4. 条带状灰岩; 5. 条带状大理岩; 6. 钙质板岩; 7. 硅化大理岩; 8. 大理岩化灰岩; 9. 角砾状大理岩; 10. 矿化大理岩; 11. 铅锌矿体; 12. 矿化基性岩脉; 13. 基性岩脉

膏; Pb-Mo. F₁ 代表 Cu 矿化元素组合, 因子得分高的样品主要为大理岩型硫化物铜铅锌矿石、矿化大理岩、构造片岩及受构造改造的碳酸盐岩等; F₂ 代表钠化和硅化蚀变元素组合, 因子得分高的样品主要为矿化或强片理化基性岩脉、钾长石化大理岩等;

F₃ 代表钾化蚀变元素组合, 因子得分高的样品主要为灰岩、大理岩化灰岩和构造片岩等; F₄ 金矿化元素组合, 因子得分高的样品主要为铅锌矿石和矿化围岩(含基性岩脉和碳酸盐岩); F₅ 代表铅矿化元素组合, 因子得分高的样品主要为矿石、矿化基性岩

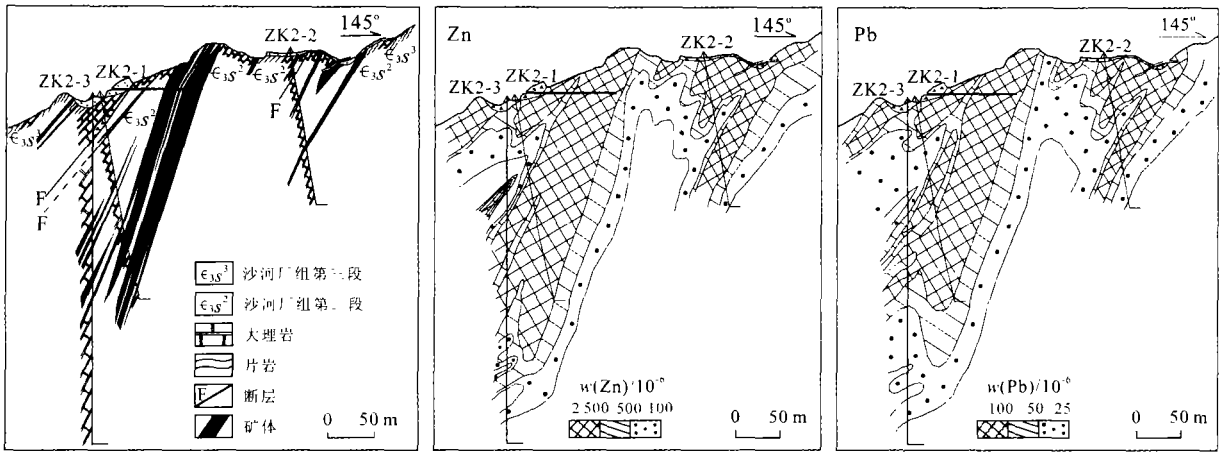


图 3 芦子园铅锌矿床 2 号勘探线地质及地球化学剖面图(勘探线剖面据云南地调院第四地质调查所修编)
 Fig. 3 Geological and geochemical section in No. 2 exploration line of Luziyuan Pb-Zn deposit

脉、大理岩化灰岩等。

芦子园矿区 2 号勘探线地球化学原生晕剖面(图 3)反映了深部铅—锌矿化的变性和较好的资源潜力。利用钻孔 ZK2—3 的元素分析数据(45 件样品)进行了因子分析,因子累积方差贡献为 75。结果表明,存在着以下 5 种元素组合: F₁: Cr—V—Sn—Mo—K—Na—Si; F₂: Pb—Zn—Au—Co; F₃: Cu—Ag—Sn; F₄: As—Sb—Ni—Co; F₅: W—Bi—F。F₁ 代表钾、钠、硅蚀变元素组合,因子得分高的样品主要为铅锌硫化物矿石、金属矿化的基性岩脉等; F₂ 铅锌矿化元素组合,因子得分高的样品主要为铅锌硫化物矿石和近矿大理岩等; F₃ 铜矿化元素组合,因子得分高的样品主要为铅锌矿石和矿化基性岩脉等; F₄ 黄铁矿化元素组合,因子得分高的样品主要为铅锌矿石、脉状矿化大理岩、片理化大理岩和黄铜矿化基性岩脉等; F₅ 因子地质意义尚不明确,得分高的样品主要为铅锌矿石、矿化基性岩脉、近矿大理岩等。

4 流体包裹体

利用芦子园矿床的石英—碳酸盐脉型铅锌矿石磨制了包裹体测温片 6 片,镜下发现的原生包裹体多为富液二相包裹体和纯液相包裹体,很少看见含子矿物的三相包裹体。对石英、方解石中的气液二相包裹体进行了测温,结果见表 3。

从表 3 可以看出,石英中的包裹体较小,大小在 5~8 μ 之间的约占 95%;气液比多在 5%~10%之间,少数达到 15%,有个别气体包裹体,气液比达

80%;均一法测温度范围最低 150 °C,最高 421 °C, ω(NaCl)盐度为 3.5%~16.1%。频数直方图表现出明显的多峰分布模式,且数据集中分布在 2 个温度范围内,由此可以划分出 2 个期次,160~280 °C, 280~420 °C(图 4),表明了热液矿化也大致经历了 2 个阶段,中高温和中低温阶段。方解石中的包裹体也较小,大小 5~6 μ,以富液二相包裹体为主,气液比 5%~7%,均一温度为 150~240 °C, ω(NaCl)盐度为 2.9%~8.7%。根据均一温度和盐度可进一步推算出芦子园矿床的成矿流体的密度为 0.834~0.957(g·cm⁻³),均一压力为(7.24~72.05)×10⁵ Pa。

通过对成矿流体特征的初步研究,得到了流体包裹体的均一温度、均一压力和流体盐度、密度等重要参数。由于工作程度等的限制,难以求得准确的成矿温度和压力值,故将均一温度和均一压力作为成矿温度和压力的下限。

总之,铅锌矿化经历中低温(160~280 °C)和中高温(280~420 °C)2 个矿化阶段,根据均一温度和盐度进一步推算的芦子园铅锌矿床的成矿流体的密度为 0.834~0.957(g·cm⁻³),均一压力为(7.24~72.05)×10⁵ Pa。

5 稳定同位素

在芦子园矿床采集的 4 件矿石样品在双目镜下挑选方铅矿和闪锌矿单矿物后,在中国地质调查局宜昌同位素地球化学开放实验研究室进行了硫、铅稳定性同位素测试,分析结果如表 4,5 所示。

表3 芦子园铅锌矿包裹体特征及测定结果

Table 3 Characteristics and analytical results for fluid inclusion of Luziyuan Pb-Zn deposit

样品编号	矿物	成矿阶段	类型	相态类型	形态	颜色	大小/ μm	气液比/%	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷冻温度	盐度 $w(\text{NaCl})/\%$
03B-T1	石英	成矿期	原生	富液二相	①②③	无	5~10	5~10	194~253	-5.0~-2.9	4.2~7.9
03B-T2	石英	成矿期	原生	富液二相	①③	无	5~10	5~10	182~260	-6.8~-4.4	7.0~10.2
	方解石	成矿期	原生	富液二相	①②	无	5~6	5~7	150~240	-5.6~-1.7	2.9~8.7
03B-T3	石英	成矿期	原生	富液二相	①②③	无	5~15	5~10	173~410	-4.3~-2.4	4.0~6.9
03B-T4	石英	成矿期	原生	富液二相	①②③	无	5~10	7~10	166~421	-10.2~-4.3	6.9~14.2
03B-T5	石英	成矿期	原生	富液二相	①③	无	5~15	5~10	167~421	-11.1~-2.1	3.5~15.5
03B-T6	石英	成矿期	原生	富液二相	①②③	无	5~8	7~15	196~380	-12.1~-4.3	6.9~16.1

注:①. 椭圆形;②. 负晶形;③. 不规则型。

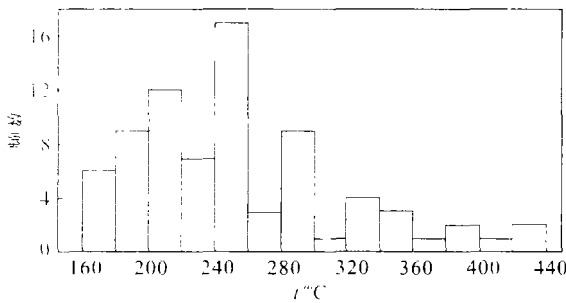


图4 芦子园铅锌多金属矿床原生包裹体温度频数直方图
Fig. 4 Temperature frequency histogram of original fluid inclusion in Luziyuan Pb-Zn deposit

表4 芦子园铅锌矿矿石硫同位分析结果

Table 4 Ore S isotope results of Luziyuan Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	$\delta(^{34}\text{S})$ ($\text{CDT} \times 10^{-3}$)	矿石类型	采样地点
16	闪锌矿	10.17	大理岩型条带状铅锌矿石	芦子园矿床
17	方铅矿	9.89	大理岩型条带状铅锌铜矿石	芦子园矿床
18	方铅矿	9.23	大理岩型角砾状铅锌矿石	芦子园矿床
19	闪锌矿	9.37	大理岩型条带状铅锌矿石	芦子园矿床

5.1 硫同位素

从表4可以看出,芦子园铅锌矿床大理岩型条带状铅锌矿石和角砾状矿石中的方铅矿和闪锌矿,其硫同位素组成为 $(9.23 \sim 10.17) \times 10^{-3}$,平均值为 9.36×10^{-3} ,具有变化范围窄、硫同位素组成相对均一的特点,并表现出相对富集 ^{34}S 的同位素组成特点。芦子园铅锌矿床矿石中闪锌矿和方铅矿的硫同位素组成明显高于源于深部与岩浆作用有关的硫化物的硫同位素组成及其变化范围,并低于同期海水的硫同位素值(寒武纪下限值为 15×10^{-3}),而是介于二者之间,更可能反映了岩浆源硫和地层中海水源硫的混合特点。

芦子园铅锌矿床矿石中闪锌矿的 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $(10.17 \sim 9.89) \times 10^{-3}$,方铅矿的 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $(9.23 \sim 9.52) \times 10^{-3}$,闪锌矿的 $\delta(^{34}\text{S})$ 值略大于方铅矿,与硫同位素在热液矿物中的平衡结晶顺序相一致,说明硫是在同位素平衡的情况下沉淀的,即硫化物形成时与成矿流体基本上达到了硫同位素平衡,故二者是在平衡共生条件下形成,应为同一矿化期的产物。

5.2 铅同位素

芦子园矿床的矿石铅同位素比较接近,且都相当稳定,正常变化范围小于0.3%,铅同位素组成基本上可以认为是均一的(表5), μ 值均在9~10之间,Th/U比值集中在3.82~4.0之间,且变化范围很小。 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 为18.224~18.338,离差为0.04; $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 为15.715~15.849,离差为0.06; $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 为38.381~38.874,离差为0.18。铅同位素组成属于正常铅。矿床中闪锌矿和方铅矿的铅同位素数据点都落在正常铅演化线之上,数据点较集中,揭示两矿床中的铅具有较均一的来源。铅同位素模式年龄在405~509 Ma,小于地层年龄。在铅同位素的 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解中(图5),矿石铅投影点多数位于壳源铅和与岩浆作用有关的铅源边界线范围内,仅一点的铅同位素表现为明显的壳源铅特点。在Zartman和Doe的铅构造模式演化曲线上(Zartman and Doe, 1993),数据点主要分布于上地壳演化线附近及其上部(图6)。矿床中矿石铅的同位素组成反映了壳源铅和与岩浆作用有关的铅相混合的特点。矿石铅同位素组成所反映的成矿过程曾受到岩浆活动的影响这一结论与硫同位素的研究结果是一致的。

6 成矿机制探讨

镇康芦子园铅锌矿矿体都产于上寒武统沙河厂

表 5 芦子园铅锌矿矿石铅同位素分析结果

Table 5 Ore Pb isotope results of Luziyuan Pb-Zn deposit

样号	矿物	$\omega(^{206}\text{Pb})/\omega(^{204}\text{Pb})$	$\omega(^{207}\text{Pb})/\omega(^{204}\text{Pb})$	$\omega(^{208}\text{Pb})/\omega(^{204}\text{Pb})$	φ	μ	年龄 (H-H)	$\omega(\text{Th})/\omega(\text{U})$	矿石类型
16	闪锌矿	18.271±0.003	15.715±0.003	38.484±0.010	0.605	9.71	405	3.85	大理岩型条带状铅锌矿石
17	闪锌矿	18.247±0.001	15.716±0.001	38.446±0.002	0.606	9.71	422	3.84	大理岩型条带状铅锌铜矿石
18	方铅矿	18.224±0.002	15.697±0.002	38.381±0.005	0.606	9.68	417	3.82	大理岩型角砾状铅锌矿石
19	方铅矿	18.338±0.002	15.849±0.002	38.874±0.007	0.615	9.97	509	4.00	大理岩型条带状铅锌矿石

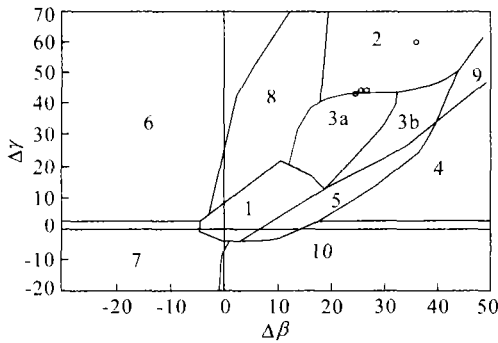


图 5 芦子园铅锌矿床矿石铅的 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类 (底图据朱炳泉, 1998)

Fig. 5 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ genetic classification map showing Pb isotope distribution of Luziyuan Pb-Zn deposit 1. 幔源铅; 2. 上地壳源铅; 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. 退变质作用铅

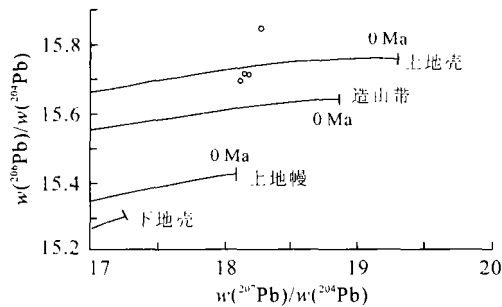


图 6 芦子园铅锌矿矿石铅同位素组成 (据 Zartman and Doe, 1981 铅演化模式编绘)

Fig. 6 Isotopic composition of Pb of ores in Luziyuan Pb-Zn deposit

迹象表明,地层不是矿质的惟一来源。

矿区基性岩脉发育,在芦子园矿床的平洞内可见钾长石脉,它们与铅锌多金属矿化具有密切的空间分布关系.前已述及,这些脉体强烈富集 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、As、Sb、Bi、Sn、F 等矿化组分和矿化剂组分,这与工业矿体富集的组分具有一致性.矿化脉岩是连结成矿岩体和矿床的桥梁,是示踪成矿组分来源于深部侵入体的诊断性标志。

寒武纪保山—镇康地区介于川滇古陆与高黎贡山隆起之间,晚寒武世为正常浅海陆棚相沉积,因靠近冈瓦纳古陆边缘,物源丰富,沉积较快,有利于铅锌多金属的聚集,形成初始矿源层.而根据物探和遥感方法结合野外地质观察推断的隐伏中酸性岩体则可能为后期成矿提供了重要的热源和部分成矿物质.因此,初步认为镇康地区碳酸盐岩中的铅锌多金属矿化可能与上寒武统局部层位及隐伏岩体有关。

References

Anderson, I. K., Ashton, J. H., Boyce, A. J., et al., 1998. Ore depositional processes in the Navan Zn-Pb deposit, Ireland. *Economic Geology*, 97(5): 535-563.

Banks, D. A., Boyce, A. J., Samson, I. M., 2002. Constraints on the origins of fluids forming Irish Zn-Pb-Ba deposits: Evidence from the composition of fluid inclusions. *Economic Geology*, 97(3): 471-480.

Chen, J. F., Yu, G., Xue, C. J., et al., 2004. Pb isotope geochemistry in cluster of lead-zinc-gold-silver deposits in Liaodong rift. *Science in China (Series D)*, 34(5): 404-411 (in Chinese).

Deng, B. F., 1995. Metallogenic model of mercury and lead-zinc deposits in Baoshan-Zhenkang area. *Yunnan Geology*, 14(4): 355-364 (in Chinese with English abstract).

Gomez-Fernandez, F., Both, R. A., Mangas, J., et al., 2000. Metallogenesis of Zn-Pb carbonate-hosted mineralization in the southeastern region of the Picos de Europa (central northern Spain) Province: Geologic, fluid inclu-

组地层碳酸盐岩地层中,且受断裂破碎带及层间破碎带控制,呈脉状产出,具有层控矿床的特征.前已述及,上寒武统总体上成矿元素 Zn、Pb、Cu 高背景含量接近于地壳克拉克值,但各组下属的某些段具成矿元素的高背景,可能构成 Zn、Pb、Cu 成矿的初始矿源层.譬如,沙河厂组有可能是 Zn 矿化的矿源层,而其下段有可能是 Cu 矿化的矿源层;但是,有

- sion, and stable isotope studies. *Economic Geology*, 95 (1): 19–40.
- Hitzman, M. W., Redmond, P. B., Beatty, D. W., 2002. The carbonate-hosted Lisheen Zn-Pb-Ag deposit, County Tipperary, Ireland. *Economic Geology*, 97 (8): 1627–655.
- Li, L. J., Liu, H. T., Liu, J. S., 1999. A discussion on the source bed of Pb-Zn-Ag deposits in northeast Yunnan. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 8(6): 333–339 (in Chinese with English abstract).
- Reid, D. L., Welke, H. J., Smith, C. B., et al., 1997. Lead isotope patterns in Proterozoic stratiform mineralization in the Bushmanland Group, Namaqua Province, South Africa. *Economic Geology*, 92(2): 248–258.
- Robinson, M., Godwin, C. I., 1995. Genesis of the blende carbonate-hosted Zn-Pb-Ag deposit, north-central Yukon territory: Geologic, fluid inclusion and isotopic constraints. *Economic Geology*, 90(2): 369–384.
- Schneider, J., Boni, M., Laponi, F., et al., 2002. Carbonate-hosted zinc-lead deposits in the lower Cambrian of Hunan, south China: A radiogenic (Pb, Sr) isotope study. *Economic Geology*, 97(8): 1815–1827.
- Wang, S. L., Wang, D. B., Zhu, X. Y., et al., 2002. Ore fluid geochemistry of Tamu-Kala Pb-Zn deposit in Xinjiang. *Geology-Geochemistry*, 30(4): 34–39 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. H., 1996. Genetic model for mineralization of zinc-lead belt in eastern Guizhou. *Guizhou Geology*, 13(1): 7–23 (in Chinese with English abstract).
- Wouter, H., Phillippe, M., Henryk, K., et al., 2003. Carbonate-hosted Zn-Pb deposits in upper Silesia, Poland: Origin and evolution of mineralizing fluids and constraints on genetic models. *Economic Geology*, 98 (5): 911–932.
- Xie, S. Y., Chen, D. J., Xin, H. Q., et al., 2004. Mineralization potentiality and prospecting direction for lead-zinc deposit of sedimentation-exhalation in Beishan region, Huanjiangxian, Guangxi. *Mineral and Geology*, 18(3): 217–219 (in Chinese with English abstract).
- Zartman, E. R., Doe, B. R., 1981. Plumbotectonics—The model. *Tectonophysics*, 75(1): 135–162.
- Zhao, Z. F., Lu, Y. X., Xie, Y. H., et al., 2002. An example study of remote sensing & GIS metallogenetic prognosis in Luziyuan area, Zhenkang. *Yunnan Geology*, 21 (3): 300–307 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, B. Q., 1998. Theory and application of isotopic system in the earth science. Science Press, Beijing, 224–226 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈江峰, 喻钢, 薛春纪, 等, 2004. 辽东裂谷带铅锌金银矿集区 Pb 同位素地球化学. *中国科学(D辑)*, 34(5): 404–411.
- 邓必方, 1995. 保山—镇康地区汞、铅锌矿床的成矿模式. *云南地质*, 14(4): 355–364.
- 李连举, 刘洪滔, 刘继顺, 1999. 滇东北铅、锌、银矿床矿源层问题探讨. *有色金属矿产与勘查*, 8(6): 333–339.
- 王书来, 汪东波, 祝新友, 等, 2002. 新疆塔木—卡兰古铅锌矿床成矿流体地球化学特征. *地质地球化学*, 30(4): 34–39.
- 王云华, 1996. 黔东铅锌矿的成矿规律及成矿模式. *贵州地质*, 13(1): 7–23.
- 谢世业, 陈大经, 辛厚勤, 等, 2004. 广西环江县北山地区喷流沉积铅锌矿资源潜力及找矿方向. *矿产与地质*, 18(3): 217–219.
- 赵志芳, 卢映祥, 谢蕴宏, 等, 2002. 镇康芦子园地区遥感和 GIS 成矿预测示范研究. *云南地质*, 21(3): 300–307.
- 朱炳泉, 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用. 北京: 科学出版社, 224–226.