

贵州西部铅锌成矿作用与成矿模式

刘玲¹, 金中国^{1*}, 郑明泓¹, 黄智龙², 袁民汕¹, 曾道国¹, 蔡国胜¹, 吴莎³

1 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵州 贵阳 550005

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

3 贵州大学资源环境学院, 贵州 贵阳 550025

位于上扬子西缘成矿带东侧的水城-普定铅锌成矿区广泛产出碳酸盐岩容矿的铅锌矿床。成矿地质特征显示, 铅锌矿化常沿 NW 向、NNE-NE 向的褶皱带成群成带产出, 赋矿层位和容矿岩石主要为碳酸盐岩, 成因上与岩浆岩无直接联系。铅锌矿体产出有主要 2 种类型, 一类呈脉状、透镜状、囊状产于上古生界泥盆系-二叠系地层中, 容矿岩石主要为灰岩、泥灰岩、白云岩, 断裂构造是主要的控矿因素。矿石品位相对高, $Pb+Zn > 10\%$, 常伴生有益元素 Ge、In、Ga、Ag 等, 矿床主要分布于水城-赫章铅锌矿化集中区, 典型矿床有水城杉树林、赫章猪拱塘等; 另一类呈层状、似层状产于下古生代的寒武系地层中, 容矿岩石主要为白云岩, 断裂构造及旁侧发育的碳酸盐层位是主要控矿因素。矿石品位相对低, $Pb+Zn < 5\%$, 伴生有益元素少, 矿床主要分布于普定-织金铅锌矿化集中区, 典型矿床有普定纳雍枝、织金杜家桥等。2 种产出类型的铅锌矿床 S、C、O 及 Pb 同位素研究表明:(1)成矿流体中 S 来源于海相硫酸盐热化学还原作用(TSR)、C 主要来自海相碳酸盐岩的溶解、H₂O 主要由建造水和变质水组成, 同时有少量大气降水参与, Pb、Zn 等成矿物质主要来源于基底地层、赋矿层位提供了部分物源;(2)水城-赫章地区铅锌矿床成矿时代集中分布于 230~190 Ma, 成矿动力学背景为印支晚期碰撞造山伸展作用驱动成矿流体大规模运移在有利空间沉淀、富集成矿; 普定-织金地区铅锌矿床成矿时代为 458 Ma, 成矿动力学背景为加里东期碰撞造山运动引发大规模流体运移至前陆盆地边缘成矿。

1 成矿地质特征简述

贵州西部位于环上扬子成矿带西缘南端东侧, 属川滇黔铅锌多金属矿集区的组成部分。该区出露地层主要为石炭系-三叠系, 寒武系、志留系、泥盆系、侏罗系、白垩系地层零星分布(图 1)。地层岩性以碳酸盐岩为主, 砂岩、页岩次之, 上二叠统峨眉山玄武岩遍布全区。区域主要发育 NW 向、NNE-NE 向的高角度逆冲断层和紧密褶皱, 铅锌矿化常沿褶皱带成群成带产出, 构造控矿特征显著。铅锌矿赋矿层位和容矿岩石主要为碳酸盐岩, 成因上与岩浆岩无直接联系。矿石矿物组成较简单、围岩蚀变强度较弱, 后生成矿特征明显。铅锌矿体产出有

第一作者: 刘玲, 女, 1983 年生。高级工程师, 主要从事矿产研究。

通讯作者: 金中国, 男, 1965 年生。研究员, 博士生导师, 主要从事矿产勘查与研究。

主要 2 种类型，一类是呈脉状、透镜状、囊状产于上古生界泥盆系-二叠系地层中，矿石品位相对高， $Pb+Zn > 10\%$ ，常伴生有益元素 Ge、In、Ga、Ag 等，主要分布水城-赫章铅锌矿化集中区，典型矿床有水城杉树林、赫章猪拱塘等；另一类是呈层状、似层状产于下古生代的寒武系地层中，矿石品位相对低， $Pb+Zn < 5\%$ ，伴生有益元素少，矿床主要分布普定-织金铅锌矿化集中区，典型矿床有普定纳雍枝和织金杜家桥等（金中国等，2008，2016，2020）。

2 成矿物质来源

2.1 C、O 同位素组成特征

水城-赫章地区铅锌成矿期方解石或白云石 $\delta^{13}C_{PDB} = -7.53\text{‰} \sim +2.52\text{‰}$ ，均值 -3.87‰ ； $\delta^{18}O_{SMOW} = 13.85\text{‰} \sim 26.00\text{‰}$ ，均值 18.28‰ （表 1）。普定纳雍枝矿床 $\delta^{13}C_{PDB} = -1.00\text{‰} \sim -0.502\text{‰}$ ，均值 -0.60‰ ； $\delta^{18}O_{SMOW} = 17.60\text{‰} \sim 19.60\text{‰}$ ，均值 19.19‰ 。两个区域的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值与地幔（ $-7\text{‰} \sim -5\text{‰}$ ）、海相碳酸盐岩值均有重叠（ $-4.0\text{‰} \sim +4.0\text{‰}$ ）（Taylor, 1986）， $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值显著高于地幔、大气降水值，主要与建造水、变质水值范围重叠。上述特征表明，贵州西部地区铅锌成矿流体中 C 主要为海相碳酸盐岩的溶解提供， H_2O 主要来自建造水、变质水。其中，水城-赫章地区铅锌成矿流体中部分 C 来源于幔源，可能与该区域大面积分布玄武岩有关（黄智龙等，2004）。

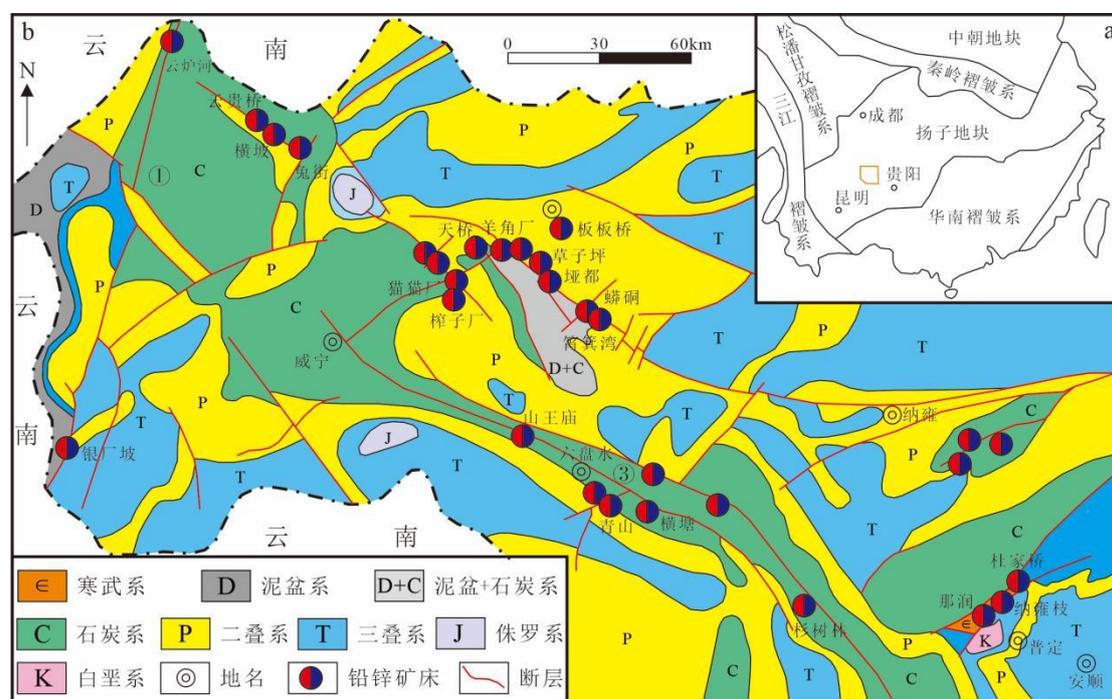


图 1 贵州西部区域构造纲要图 (a) 和铅锌矿分布图(b)（据金中国，2008 修编）

2.2 S 同位素组成特征

水城-赫章地区铅锌矿床与普定纳雍铅锌矿床黄铁矿、闪锌矿、方铅矿的 $\delta^{34}S$ 值变化范围大，分别为 $10.70\text{‰} \sim 23.80\text{‰}$ 、 $6.78\text{‰} \sim 23.60\text{‰}$ 、 $8.38\text{‰} \sim 23.8\text{‰}$ ，各矿

床 $\delta^{34}\text{S}$ 组成与地幔硫(0 ± 1)‰、生物成因硫(-30~10)‰有显著差异,而具有富重硫型、地壳来源的特。其中天桥矿床具有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 特征,反映矿床形成时硫同位素分馏达到平衡,而其余矿床未达到平衡。鉴于该区域震旦系、寒武系和石炭系等地层中均有石膏、重晶石硫酸盐矿物产出,这些硫酸盐矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成与同时期古海水 $\delta^{34}\text{S}$ 组成基本一致,暗示水城-赫章地区铅锌成矿的硫主要来自不同赋矿层位中海相硫酸盐的热化学还原作用(TSR)(周家喜等, 2010;韦晨, 2018; Wei et al., 2021)。

表 1 黔西北、黔东地区铅锌矿床成矿流体性质对比

| 典型矿床 | 成矿温度/°C | 成矿盐度 w(NaCl _{eq})/% | 碳同位素组成/‰ | 氧同位素组成/‰ | 资料来源 |
|-------|---------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---|
| 普定纳雍枝 | 91~155 | 0.62~18.30 (9.85/13) | -0.50~-1.00 (-0.6/5) | 17.6~19.6 (19.16/6) | 韦晨, 2018 |
| 赫章猪拱塘 | 120~240 | 2.1~12.9 | -7.53~+1.73 (-3.85/31) | 13.85~21.88 (18.11/31) | Wei et al., 2021 |
| 水城杉树林 | 175~247 | 3.9~22.6 (14.25/5) | -1.4~-3.1 (-1.93/7) | 18.8~20.3 (19.54/7) | 陈士杰, 1986; 钱建平, 2001 |
| 钟山青山 | 110~276 | 6.31~10.53 (8.94/3) | -5.0~-3.90 (-4.04/5) | 18.9~19.6 (19.2/5) | 陈士杰, 1986; 钱建平, 2001; Zhou et al., 2013 |
| 赫章天桥 | 150~270 | 6.09~19.39 (12.38/3) | -5.3~-3.40 (-4.54/9) | 14.7~19.5 (17.62/9) | Zhou et al., 2013, 2018 |

2.3 Pb 同位素组成特征

水城-赫章地区铅锌矿床中铅同位素组成平均分别为 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=39.193$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.782$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.642$; 普定纳雍枝矿床中铅同位素组成平均分别为 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.879$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.666$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.860$ 。两个区域的铅锌矿床铅同位素对比显示,前者相对高,暗示其成矿流体运移过程中经历了相对富放射性的铅岩层(黄智龙等, 2004; 金中国等, 2016)。

表 2 S、Pb 同位素组成表

| 矿床名称 | 矿物/样品数 | $\delta^{34}\text{S}$ 均值/‰ | 铅同位素 | 平均值 /样品数 | 资料来源 |
|--------|--------|----------------------------|--|-------------|-----------------------------------|
| 普定纳雍枝 | 闪锌矿/17 | +23.17 | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.922 \sim 37.979$ | 37.960/32 | 金中国等 2016; Wei et al., 2021 |
| | 方铅矿/3 | +18.23 | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.648 \sim 15.666$ | 15.659/32 | |
| | 黄铁矿/1 | +22.60 | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.828 \sim 17.860$ | 17.841/32 | |
| 黔西北猪拱塘 | 闪锌矿/36 | +15.59 | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=39.061\sim 39.366$ | 39.227/34 | Wei et al., 2021 |
| | 方铅矿/5 | +15.41 | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.757\sim 15.769$ | 15.763/34 | |
| | 黄铁矿/13 | +15.57 | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.566\sim 18.758$ | 18.666/34 | |
| 黔西北杉树林 | 闪锌矿/13 | +18.79 | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.302\sim 38.957$ | 38.573/20 | Zhou et al., 2013 |
| | 方铅矿/6 | +15.41 | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.505\sim 15.874$ | 15.693/20 | |
| | 黄铁矿/1 | +17.60 | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.362\sim 18.654$ | 18.513/20 | |
| 黔西北青山 | 闪锌矿/8 | +16.36 | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.831\sim 39.631$ | 39.248/12 | Zhou et al., 2018 |
| | 方铅矿/6 | +14.60 | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.701\sim 15.920$ | 15.801/12 | |
| | 黄铁矿/7 | +14.81 | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.591\sim 18.768$ | 18.641/12 | |
| 黔西北天桥 | 闪锌矿/11 | +12.54 | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.875\sim 39.152$ | 38.969/13 | Zhou et al., 2018 |
| | 方铅矿/7 | +8.84 | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.708\sim 15.772$ | 15.734/13 | |
| | 黄铁矿/5 | +13.30 | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.481\sim 18.560$ | 18.520/13 | |
| | 方铅矿/13 | +12.55 | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.439\sim 15.855$ | 15.717/95 | |
| | 黄铁矿/16 | +15.95 | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.251\sim 18.530$ | 18.465/95 | |

图 2 看出, 研究区大部分样品落入上地壳 Pb 演化线之上, 表明成矿金属物质主要来自基底岩石及赋矿地层。其中, 普定纳雍枝和赫章猪拱塘铅锌矿床铅同位素组成变化范围小, 数据较集中, 暗示成矿物质来源单一或均一化程度高(黄

智龙等, 2004); 而水城杉树林铅锌矿床部分样品铅同位素组成变化大, 落入下地壳与造山带演化线之间, 反映成矿物质还可能来源地幔和下地壳。

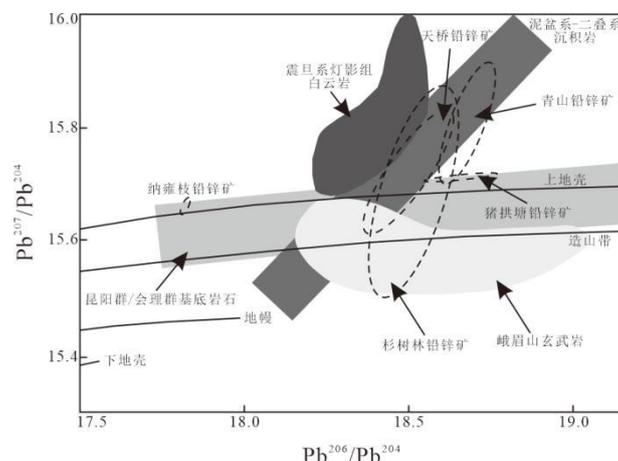


图 2 典型铅锌矿床铅同位素组成示意图

3 成矿动力学背景及成矿模式

大量同位素定年数据显示, 水城-赫章地区铅锌成矿时代集中分布在 230~190 Ma 之间 (黄智龙等, 2004), 成矿动力学背景为印支晚期碰撞造山伸展作用驱动成矿流体大规模运移在有利空间沉淀、富集成矿。成矿模式为印支晚期碰撞造

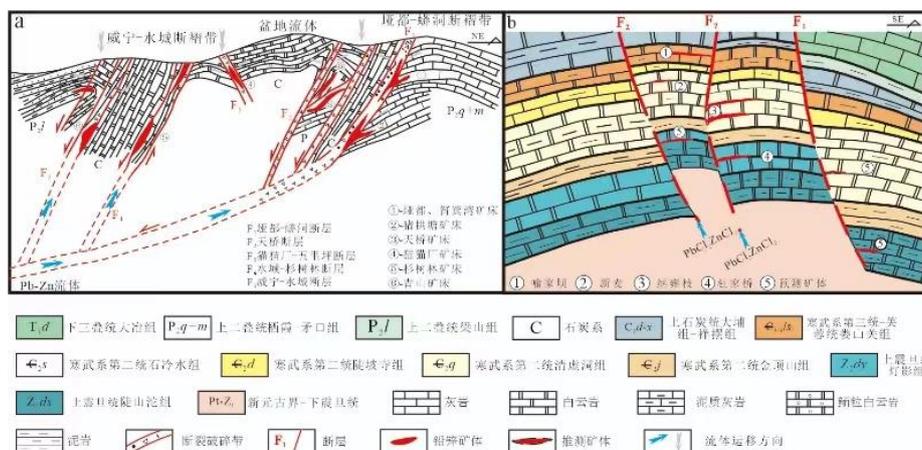


图 3 贵州铅锌成矿模式图 (a-水城-赫章铅锌成矿模式, 据韩润生等, 2020 修改; b-普定纳雍枝铅锌成矿模式)

山作用诱发垭都-蟒洞深大断层活化, 在挤压动力向伸展转换过程中驱动深部富含 Pb、Zn 流体沿断层构造系统向上运移, 迁移至主断层破碎带、旁侧次级断裂带、层间虚脱空间与富 S 的盆地热水流体混合, 形成中-低温度、中-低盐度的成矿流体, 物理化学条件发生急剧变化, 大量 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 与 S^{2-} 结合快速沉淀形成铅锌矿体。

普定纳雍枝矿床成矿时代为 458Ma (王生伟等, 2018), 成矿动力学背景为加里东期碰撞造山运动引发大规模流体运移至前陆盆地边缘成矿。成矿模式为加里东期造山运动促使黔中地区发生强烈的褶皱, 驱动地层建造水与下渗的大气降

水混合形成盆地流体, 盆地流体水/岩反应和与硫酸盐发生热化学还原作用, 形成富 S 的酸性流体。同时造山作用诱发基底富 Pb、Zn 等成矿元素的热卤水沿区域性断裂向上运移, 当两种流体混合, 物理化学条件发生变化, Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 络合物被破坏, Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 析出并与 S^{2-} 结合沉淀成矿, 在断层旁侧的褶皱虚脱空间、层间破碎带及蚀变白云岩中形成层状、似层状状铅锌矿体, 在局部断层内形成陡倾斜的脉状矿体(图 3b)。

4 结论

(1) 铅锌成矿金属物质主要来自基底岩石及赋矿地层, C 主要为海相碳酸盐岩的溶解提供, H_2O 主要来自建造水、变质水, 硫主要来自不同赋矿层位中海相硫酸盐的热化学还原作用(TSR)。

(2) 黔西北铅锌成矿时代集中在 200 Ma 左右, 为印支晚期碰撞造山作用驱动大规模流体运移在有利空间沉淀、富集成矿; 普定纳雍枝成矿时代为 458Ma, 反映出与加里东期碰撞运动引发大规模流体运移作用密切相关。

参考文献

- [1] Taylor B E.1986. Magmatic volatiles: Isotope variation of C, H and S reviews in mineralogy [J]. Reviews Mineral, 16:185-225.
- [2] Wei C. 2021. Ore-forming fluid and ore genesis of the Nayongzhi deposit in northwestern Guizhou[D]. Supervisor: Huang Z L. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences.1-95(in Chinese with English abstract).
- [3] Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, et al. 2013. 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, 53: 77-92.
- [4] Zhou J X, Luo K, Wang X C, et al. 2018. Ore genesis of the fule Pb-Zn deposit and its relationship with the Research, 54: 161-179.
- [5] 陈士杰.1986.黔西-滇东北铅锌矿床成因探讨[J].贵州地质,3(8): 211-222.
- [6] 韩润生, 王明志, 金中国, 等. 2020. 黔西北铅锌多金属矿集区成矿构造体系及其控矿机制[J]. 地质学报, 94(3): 850-868.
- [7] 黄智龙, 陈进, 韩润生, 等. 2004. 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. 1-145.
- [8] 金中国. 2008. 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. 1-105.
- [9] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 2016. 贵州普定纳雍枝铅锌矿床成因: S 和原位 Pb 同位素证据[J]. 岩石学报, 32(10): 3441-3455.
- [10] 金中国, 黄智龙, 郑明泓, 等. 2020. 贵州碳酸盐岩型铅锌矿床地质特征与容矿机理[J]. 矿物学报, 40(4): 346-355.
- [11] 钱建平. 2001. 黔西北威宁-水城铅锌矿带动力成矿作用研究[J]. 地质地球化学, 29(3): 134-139.

- [12] 王生伟, 金灿海, 张珂, 等. 2018. 贵州五指山特大型铅锌矿床闪锌矿的 Rb-Sr 定年及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 38(3): 77-87.
- [13] 韦晨. 2018. 黔西北纳雍枝铅锌矿床成矿流体演化及矿床成因研究(硕士论文) [D]. 导师: 黄智龙. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所. 1-95.
- [14] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 2010. 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, 56(4): 513-524.