

文章编号: 1000-4734(2017)06-0610-09

# 黔东南从江友能铅锌矿床 REE 和 Pb 同位素 地球化学特征与成因

安琦<sup>1</sup>, 包广萍<sup>2,3\*</sup>, 兰安平<sup>1</sup>, 张坤<sup>1</sup>, 游家贵<sup>1</sup>, 孟庆田<sup>1</sup>

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 一〇四地质大队, 贵州 都匀 558000; 2. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650504;  
3. 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:** 贵州友能铅锌矿床位于黔东南从江县境内, 毗邻地虎一九星铜多金属矿床和那哥铜铅多金属矿床, 是一个以 Pb 为主的多金属矿床。对该矿床铅锌矿石进行了稀土元素和 Pb 同位素地球化学研究, 结果表明, 铅锌矿石的 REE 总量较高,  $\Sigma\text{REE}$  变化范围为  $30.4 \times 10^{-6} \sim 240 \times 10^{-6}$ , Eu 负异常明显 ( $\delta\text{Eu} = 0.52 \sim 0.81$ ), Ce 异常不显著 ( $\delta\text{Ce} = 0.95 \sim 1.04$ , 除 1 个样品为 0.55 外)。对比发现, 友能铅锌矿石的 REE 配分特征与赋矿围岩 (浅变质岩) 较为相似, 而与研究区出露的基性-超基性和中酸性岩浆岩差异明显。总体上, 铅锌矿石的 REE 特征及相关参数表明, 围岩参与了友能矿床的成矿, 铅锌成矿流体中的 REE 可能是在还原环境下通过水/岩相互作用继承源区岩石的。此外, 矿床中铅锌矿石的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为  $38.074 \sim 38.823$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为  $15.631 \sim 15.895$  和  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为  $17.875 \sim 18.224$ , 而围岩的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为  $38.003 \sim 38.457$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为  $15.548 \sim 15.650$  和  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为  $17.774 \sim 18.181$ , 两者 Pb 同位素比值较为相似, 进一步表明围岩为成矿提供了物质。综合研究认为, 友能铅锌矿床属于构造控制的热液矿床, 铅锌等金属元素来源与赋矿围岩 (浅变质岩) 关系密切。

**关键词:** 稀土元素; Pb 同位素; 矿床成因; 友能铅锌矿床; 黔东南从江

**中图分类号:** P571; P618

**文献标识码:** A

**doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2018.38.235

**作者简介:** 安琦, 男, 1971 年生, 高级工程师, 从事勘查与找矿研究. E-mail: 100118721@qq.com

## Geochemical Characteristics of REE and Pb Isotopes for the Youneng Pb-Zn Deposit in Congjiang County, Guizhou Province, China and a Primary Discussion of Its Ore Genesis

AN Qi<sup>1</sup>, BAO Guang-ping<sup>2,3\*</sup>, LAN An-ping<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, YOU Jia-gui<sup>1</sup>, MENG Qing-tian<sup>1</sup>

(1. No. 104 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Duyun 558000, China; 2. School of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650504, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The Youneng Pb-Zn deposit is located in Congjiang County, southeastern Guizhou Province, and is adjacent to the Dihu-Jiuxing Cu polymetallic deposit and the Nage Cu-Pb polymetallic deposit. It is a Pb-dominant polymetallic deposit. In this paper, REE and Pb isotope geochemical study of Pb-Zn ores in this deposit has been undertaken. The results show that Pb-Zn ores have relatively high  $\Sigma\text{REE}$  contents, ranging from 30.4 to  $240 \times 10^{-6}$ , with significant negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu} = 0.52 \sim 0.81$ ) and insignificant Ce anomalies ( $\delta\text{Ce} = 0.95 \sim 1.04$ , with exception of 0.55 for one sample). This indicates that the REE in the ore-forming fluids could be inherited from the source rocks through the water/rock

**收稿日期:** 2018-07-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41763003); 贵州省地矿局科研项目 (2017[4]; 2016[40]; 2016[09]); 云南大学引进人才科研启动项目 (YJRC4201804); 云南大学国家自然科学基金优秀青年培育项目 (2018YDJQ009)

\* 通讯作者, E-mail: baoguangping@ynu.edu.cn

interaction under the reduced environment. The REE distribution patterns of ores of the Youneng Pb-Zn deposit are quite similar to those of wall rocks (lower metamorphic rocks), but obviously different from those of the basic-ultrabasic and intermediate-acidic magmatic rocks developed in the study area. Generally, the REE characteristics and parameters of ores indicate that the wall rocks could have involved in the mineralization of the Youneng deposit, as the REE of ore-forming fluids could be inherited from the source wall rocks via the water/rock interaction under reduced environment. In addition, the  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , and  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios of the ores range from 38.074 to 38.823, from 15.631 to 15.895, and from 17.875 to 18.224, respectively. The  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios of wall rocks range from 38.003 to 38.457, from 15.548 to 15.650, and from 17.774 to 18.181, respectively. It can be seen that the Pb isotopic ratios of ores and wall rocks are quite similar. This further indicates that the wall rocks could have provided materials for mineralization. In summary, it is believed that the Youneng Pb-Zn deposit is a structurally controlled hydrothermal deposit and its Pb, Zn metal elements could be mainly sourced from the ore-bearing wall rocks.

**Keywords:** REE; Pb isotopes; Ore genesis; the Youneng Pb-Zn deposit; Congjiang County in SE Guizhou

黔东南从江—榕江一带是贵州省内岩浆活动最为强烈的地区之一<sup>[1]</sup>,也是贵州省内多金属矿化显著的地区之一<sup>[1-2]</sup>。区内出露火成岩从基性岩<sup>[3-4]</sup>、基性火山岩<sup>[5-6]</sup>、中-酸性杂岩体<sup>[6]</sup>、花岗岩<sup>[7]</sup>到花岗斑岩<sup>[8-9]</sup>均有,多金属矿床(点)广布,有贵州省内最大的铜多金属矿床(地虎—九星)<sup>[10]</sup>和区内代表性的那哥铜铅多金属矿床<sup>[11]</sup>等。以往研究认为这些新元古代岩浆活动与区内多金属成矿可能存在内在的成因联系<sup>[12]</sup>,但一些成矿年代学研究表明,这些矿床可能形成于加里东期<sup>[13]</sup>,与新元古代岩浆作用没有直接的成因联系。区内金及铜铅锌多金属矿床是否与新元古代岩浆作用有关,仍是一个有待深入研究的科学问题。

友能铅锌矿床是近年来在从江宰便多金属成矿区内新发现的一处多金属矿床,矿化以铅矿化为主,不同于那哥的铜铅组合<sup>[11]</sup>以及地虎—九星的铁铜金组合<sup>[10]</sup>。该矿床地质、地球化学研究基本是空白,仅有刘永坤等<sup>[14]</sup>简单报道。由于缺乏系统的矿床地质和地球化学资料,对该矿床的成因认识尚不清晰,制约了对包括友能矿床在内的宰便成矿区多金属矿床找矿预测的指导。稀土元素和 Pb 同位素能指示成矿物质的来源和矿床形成的环境,是研究矿床成因的重要手段之一<sup>[15-17]</sup>。本文通过对友能铅锌矿床主矿体铅锌矿石和远矿围岩的 REE 与 Pb 同位素地球化学对比研究,以揭示该矿床的成矿物质来源和成矿环境,为认识铅锌成矿作用提供新的地球化学依据。

## 1 区域地质概况

友能铅锌矿床位于江南造山带西南段,从江宰便多金属成矿区北西部<sup>[1]</sup>(图 1)。区内经历多期构造运动,形成的构造形迹复杂,以 SN、NE、NW 和 EW 向构造为主,包括一系列褶皱、断裂和韧性剪切(滑脱)带<sup>[18]</sup>。区域出露地层,由老至新包括四堡岩群文通岩组和新元古界下江群甲路组、乌叶组和番召组<sup>[1]</sup>(图 1)。地层岩性以浅变质沉积岩为主,包括千枚岩、绢云母板岩和片岩等<sup>[1]</sup>。区内新元古代火成岩十分发育,包括宰便辉绿岩<sup>[3-4]</sup>(848 Ma)、甲路组基性火山岩<sup>[5-6]</sup>(815 Ma)、加榜辉绿岩<sup>[5]</sup>(788 Ma)、秀塘中-酸性杂岩体<sup>[7]</sup>(836 Ma)、摩天岭花岗岩<sup>[6]</sup>(825 Ma)和新发现那哥隐伏花岗斑岩<sup>[8-9]</sup>(852 Ma)。加榜辉绿岩和那哥花岗斑岩空间关系密切,为同一位置产出,且均与那哥铜铅多金属矿床空间相伴(图 1)。从江宰便一带目前已发现多金属矿床(点)十余处(图 1),以地虎—九星铁铜金多金属矿床、翁浪金多金属矿床和那哥铜铅多金属矿床的规模最大,研究程度也相对较深。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿区地层

矿区出露地层主要为新元古界下江群甲路组和乌叶组(图 2)。甲路组在本区仅出露二段 b 亚段(Qbj<sup>2b</sup>)和 c 亚段。b 亚段(Qbj<sup>2b</sup>)主要为灰黄色、灰绿色灰中-厚层变质粉砂岩、板岩、粉砂质千枚岩、含锰质片岩夹变质细砂岩,厚 130~190 m; c 亚段(Qbj<sup>2c</sup>)称“上钙质岩系”,岩性为灰、灰绿色



图 1 从江宰便一带区域地质略图 (据王劲松等<sup>[1]</sup>修改)

Fig. 1. Regional geological map for the Zaibian area in Conjiang County (after Wang et al. <sup>[1]</sup>).

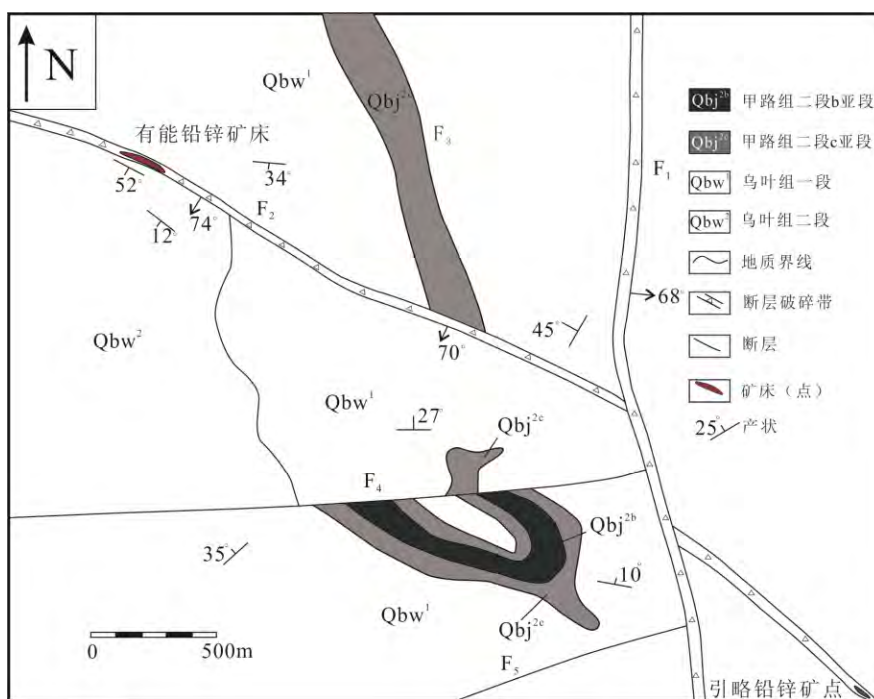


图 2 友能铅锌矿床地质略图 (据刘永坤等<sup>[14]</sup>修改)

Fig. 2. Geological sketch map for the Youneng Pb-Zn deposit (after Liu et al. <sup>[14]</sup>).

钙质千枚岩, 含钙质千枚岩、含钙质变质粉砂岩夹锰质片岩, 其中钙质千枚岩中含大理岩透镜体或大理岩条带, 大理岩多呈浅肉红色, 厚 160 m, 岩性及厚度稳定, 是划分甲路组与乌叶组的标志层。

乌叶组按岩性组合特征分为 2 段: ①乌叶组 1 段 (Qbw<sup>1</sup>), 上部由灰、灰绿色粉砂质绢云母板岩与碳质千枚岩互层组成, 夹中-厚层变质粉-细砂岩; 中部由深灰色绢云母绿泥片岩夹碳质粉砂质绢云母板岩、片岩组成, 下部由深灰色中厚层碳质粉砂质绢云母板岩、片岩组成, 厚 350~520 m; ②乌叶组 2 段 (Qbw<sup>2</sup>), 岩性以灰黑色薄-中厚碳质粉砂质绢云板岩、碳质千枚岩、碳质石英绿泥绢云母片岩为主, 夹少量变质石英粉-细砂岩, 发育水平层理、波状细纹层理及平行层理。以出现大量的黑色碳质板岩和碳质千枚岩作为与一段的划分标志, 见厚大于 430 m。

## 2.2 矿区构造

矿区构以造断裂为主, 主要发育近 SN 和 NW 向 2 组断裂 (图 2)。宰便断裂 (F<sub>1</sub>) 走向大致为南北向, 全长约 34 km, 为区域性高角度逆断层, 倾向东南, 倾角 55°~80°, 垂直断距 300~500 m, 断层破碎带宽数米至十余米。党扭断裂 (F<sub>2</sub>), 为压扭性正断层, 断层走向 290°~300°, 倾角 60°~77°, 该断层南西盘为下降盘, 南西盘和北东盘均出露甲路组、乌叶组地层, 局部地层为断层接触。断层破碎带宽 8~20 m。铅锌矿位于 F<sub>1</sub> 逆断层的西盘, 产于 F<sub>2</sub> 断裂破碎带内。

## 2.3 矿体特征和围岩蚀变

铅 (锌) 矿体主要赋存于新元古界下江群乌叶组 1 段灰、灰黑色粉砂质绢云母板岩、绢云母板岩 (图 3)。坑探工程揭露, 浅部矿体沿断层破碎带呈脉状、透镜状产出。矿脉长度大于 150 m, 厚 2~6 m, Pb 品位 1.35%~9.70%, Zn 品位 0.01%~2.08%。矿石矿物主要为方铅矿, 闪锌矿次之, 黄铁矿少见。脉石矿物以石英为主, 次为绢云母、陆源碎屑、白云石和绿泥石等 (图 3)。

矿石构造包括角砾状构造、细脉状构造、浸染状构造、浸点状构造、网脉状构造、团块状构造等 (图 3a-d)。矿石结构主要为自形-半自形-它形粒状结构、不等粒镶嵌结构、碎粒结构、包含结构和交代结构 (图 3e,f)。围岩蚀变主要有硅化、白云石化、黄铁矿化、绢云母化和绿泥石化等。

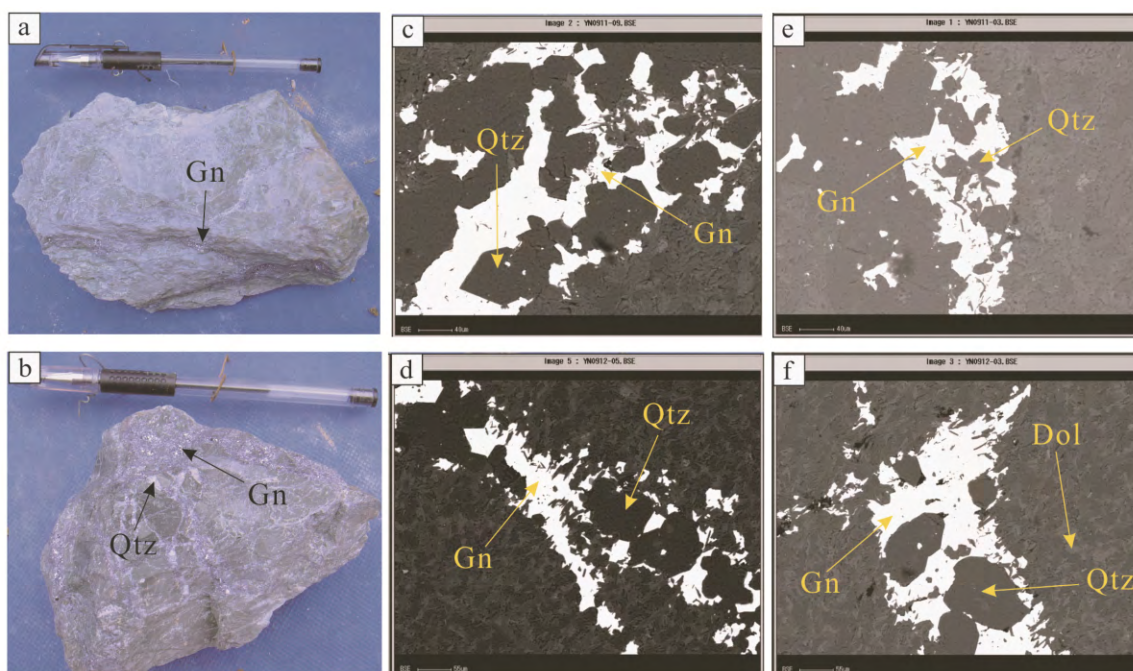


图 3 友能铅锌矿床典型矿石组构特征 (Gn-方铅矿; Qtz-石英; Dol-白云石)

Fig. 3. Typical features of minerals, textures and structures of ores from the Youneng Pb-Zn deposit.

### 3 样品来源和分析方法

样品主要采自友能铅锌矿床探矿坑道,为探矿工程揭露的主要矿体,样品为铅锌矿石和远矿围岩。矿石稀土元素采用 ICP-MS 方法,在北京核工业地质研究院的 ICP-MS 上进行,该仪器对微量元素检测下限为  $n \times 10^{-13} \sim n \times 10^{-12}$ ,稀土元素分析的相对误差优于 5%,具体分析方法见 Qi 等<sup>[19]</sup>。矿石和围岩 Pb 同位素组成在北京核工业地质研究院的 TIMS 上进行,该仪器对 1 $\mu\text{g}$  的铅  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,其相对误差 < 0.005% ( $2\sigma$ ),分析方法同文献报道<sup>[20]</sup>。

## 4 分析结果

### 4.1 稀土元素 (REE)

矿石 REE 分析结果列于表 1,可以看出,友能铅锌矿床铅(锌)矿石的  $\Sigma\text{REE}$  含量较高,为  $30.4 \times 10^{-6} \sim 240 \times 10^{-6}$ ,其  $\Sigma\text{LREE}$  含量范围为  $19.5 \times 10^{-6} \sim 181 \times 10^{-6}$ ,而  $\Sigma\text{HREE}$  含量范围为  $7.74 \times 10^{-6} \sim 58.5 \times 10^{-6}$ , $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  比值范围为 1.80~7.95,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  的变化范围为 1.24~10.83,表明友能铅锌矿床铅(锌)矿石的轻、重稀土元素发生了一定程度分异,且总体呈轻稀土富集的特征。铅(锌)矿石的  $\delta\text{Eu}$  变化范围为 0.52~0.81,具有较为明显的 Eu 负异常特征,而  $\delta\text{Ce}$  值为 0.95~1.04(除 1 个样品为 0.55 外),总体呈不明显的 Ce 异常特征。全部样品的  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  的变化范围为 1.62~3.59,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  的变化范围为 0.46~2.36,表明铅(锌)矿石的轻和重稀土内部分异不显著。

表 1 从江友能铅锌矿床硫化矿石稀土元素分析结果 ( $w_{\text{B}}/10^{-6}$ )

Table 1. Analytical results of REE contents of sulfide ores from the Youneng Pb-Zn deposit

样品	YN-09-01	YN-09-02	YN-09-03	YN-09-09	YN-09-10	YN-09-11	YN-09-12
	铅锌矿石	铅锌矿石	铅锌矿石	铅锌矿石	铅锌矿石	铅锌矿石	铅锌矿石
La	3.61	9.00	54.50	13.90	7.61	12.80	5.10
Ce	8.22	19.30	58.30	27.40	17.70	27.00	10.90
Pr	1.09	2.31	11.20	3.29	2.15	2.91	1.34
Nd	4.93	9.07	44.60	13.60	8.85	12.90	5.29
Sm	1.40	1.87	10.20	2.68	2.42	2.24	1.37
Eu	0.28	0.40	2.10	0.69	0.59	0.42	0.36
Gd	1.97	2.09	14.70	2.53	2.18	2.21	1.90
Tb	0.46	0.47	3.06	0.42	0.45	0.47	0.48
Dy	3.28	3.12	20.10	2.15	2.59	3.38	3.37
Ho	0.68	0.63	3.76	0.39	0.43	0.76	0.67
Er	2.07	2.15	10.00	1.09	1.22	2.77	2.26
Tm	0.28	0.36	1.14	0.17	0.18	0.53	0.41
Yb	1.84	2.62	5.11	0.87	1.05	3.89	2.77
Lu	0.27	0.43	0.61	0.13	0.13	0.62	0.42
$\Sigma\text{REE}$	30.4	53.8	240	69.3	47.6	72.9	36.7
$\Sigma\text{LREE}$	19.5	42.0	181	61.6	39.3	58.3	24.4
$\Sigma\text{HREE}$	10.8	11.9	58.5	7.7	8.2	14.6	12.3
$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	1.80	3.53	3.09	7.95	4.78	3.98	1.98
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	1.32	2.32	7.19	10.83	4.89	2.22	1.24
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	1.62	3.03	3.36	3.26	1.98	3.59	2.34
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	0.86	0.64	2.32	2.36	1.68	0.46	0.55
$(\text{La}/\text{Pr})_{\text{N}}$	1.30	1.53	1.92	1.66	1.39	1.73	1.50
$\delta\text{Eu}$	0.52	0.62	0.52	0.81	0.78	0.58	0.69
$\delta\text{Ce}$	0.97	0.99	0.55	0.95	1.03	1.04	0.98

### 4.2 Pb 同位素

矿石和围岩的 Pb 同位素分析结果如表 2 所示,铅(锌)矿石的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 38.074~38.823,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 15.631~15.895 和  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 17.875~18.224,  $\mu$  值为 9.55~10.08。围岩的



$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 38.003~38.457,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 15.548~15.650 和  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 17.774~18.181,  $\mu$  值为 9.43~9.63。

表 2 友能铅锌矿床铅(锌)矿石和围岩铅同位素组成

Table 2. Pb isotopic ratios of Pb-Zn ores and wall rocks from the Youneng Pb-Zn deposit

样品		$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\mu$
YN-09-01	铅锌矿石	38.717	15.895	18.224	10.08
YN-09-02	铅锌矿石	38.369	15.731	17.945	9.79
YN-09-09	铅锌矿石	38.240	15.662	18.032	9.63
YN-09-10	铅锌矿石	38.823	15.631	18.165	9.55
YN-09-11	铅锌矿石	38.091	15.654	17.897	9.64
YN-09-12	铅锌矿石	38.074	15.642	17.875	9.62
ZK701-4	千枚岩	38.215	15.634	18.012	9.58
ZK701-13	千枚岩	38.457	15.636	18.181	9.56
ZK703-2	千枚岩	38.242	15.612	17.943	9.54
ZK703-7	千枚岩	38.321	15.548	17.873	9.43
YN-09-05	千枚岩	38.003	15.595	17.774	9.54
YN-09-07	板岩	38.129	15.642	17.798	9.63
YN-09-08	角砾岩	38.213	15.65	17.946	9.62

## 5 讨论

### 5.1 成矿物质来源和成矿环境的 REE 制约

稀土元素(REE)有着极其相似的化学性质和物理性质,这样的相似性是由它们电子构型的性质决定的<sup>[21]</sup>。尽管 REE 化学行为十分相似,  $\text{REE}^{3+}$  在自然界发生变价的情况是很有限的,但它们在—些地质和地球化学过程中彼此能发生部分分馏,正是这种分馏作用在地球化学上具有重要意义<sup>[21]</sup>。由于  $\text{Ce}^{4+}$  离子半径小、电位高,所以碱性最弱,而由于  $\text{Eu}^{2+}$  离子半径在 REE 中最大、离子电位低并具有强碱性。因此,它们在地球化学过程中会与其他 REE 发生分离,导致出现或正或负的 Ce 和 Eu 异常现象<sup>[22-23]</sup>。例如,在贫 REE 的成矿流体与岩石发生水/岩相互作用时,在相对氧化的条件下,反应后的流体通常具有正 Ce 异常,而在相对还原的条件下,则具有正 Eu 异常。这就是 REE 地球化学演化的氧化-还原模式<sup>[22-23]</sup>。

友能矿床铅(锌)矿石具有较高的  $\Sigma\text{REE}$  总量(表 1),表明其 REE 含量和特征能代表成矿流体的 REE 含量和特征。从友能铅锌矿床 REE 配分模式图(图 4),不难看出这些矿石的 REE 配分模式基本相似,暗示它们从同一成矿流体中形成的且成矿过程物理化学条件并未发生显著改变。根据 REE 地球化学演化的氧化-还原模式<sup>[22-23]</sup>,矿石具有不显著的 Ce 异常特征(图 4),表明成矿流体与源区岩石发

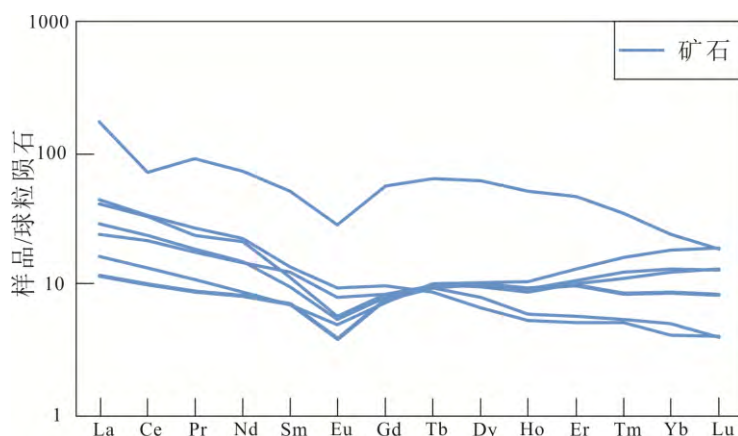


图 4 矿石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(据 Boynton<sup>[24]</sup>)

Fig. 4. Chondrite-normalized REE patterns for ores from the Youneng Pb-Zn deposit (after Boynton<sup>[24]</sup>).

生水/岩相互作用时不是在相对氧化的条件下进行的。由于成矿流体存在大量的还原态 S，成矿流体的性质是相对还原的。而相对还原的情况下，流体通常呈现正 Eu 异常<sup>[22-23]</sup>。因此，合理的解释就是源区岩石具有相对亏损 Eu 特征的。

以往工作对研究区内主要类型岩石的 REE 分析显示，赋矿浅变质岩及构造角砾岩样品  $\Sigma\text{REE}$  值介于  $74.2 \times 10^{-6} \sim 286 \times 10^{-6}$ ，具有较为明显的负 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu} = 0.79 \sim 0.88$ ) 和不显著的 Ce 异常特征 ( $\delta\text{Ce} = 0.96 \sim 1.02$ )<sup>[18]</sup>。这与友能矿床铅(锌)矿石的 REE 含量和特征很相似。相反，研究区内的辉绿岩、花岗岩和花岗斑岩，它们的  $\Sigma\text{REE}$  值<sup>[18]</sup>分别介于  $78.1 \times 10^{-6} \sim 90.9 \times 10^{-6}$ 、 $132 \times 10^{-6} \sim 193 \times 10^{-6}$  和  $74.9 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$ ，明显低于友能矿床的  $\Sigma\text{REE}$  值。此外，辉绿岩、花岗岩和花岗斑岩 Eu ( $\delta\text{Eu}$  值分别介于 0.98~1.01、0.55~0.79 和 0.44~0.56) 和 Ce ( $\delta\text{Ce}$  值分别为 0.94~0.99、0.91~1.11 和 1.00~1.02) 异常特征<sup>[18]</sup>，也与友能矿床铅(锌)矿石的 Eu 和 Ce 异常特征存在差异。再者，这些潜在源区岩石的 REE 配分模式中，浅变质岩(图 5a)与友能矿床最为相似，其它类型岩石(图 5b-d)的相似度要低得多。因此，本文认为赋矿浅变质岩最可能是友能矿床的 REE 源区岩石。

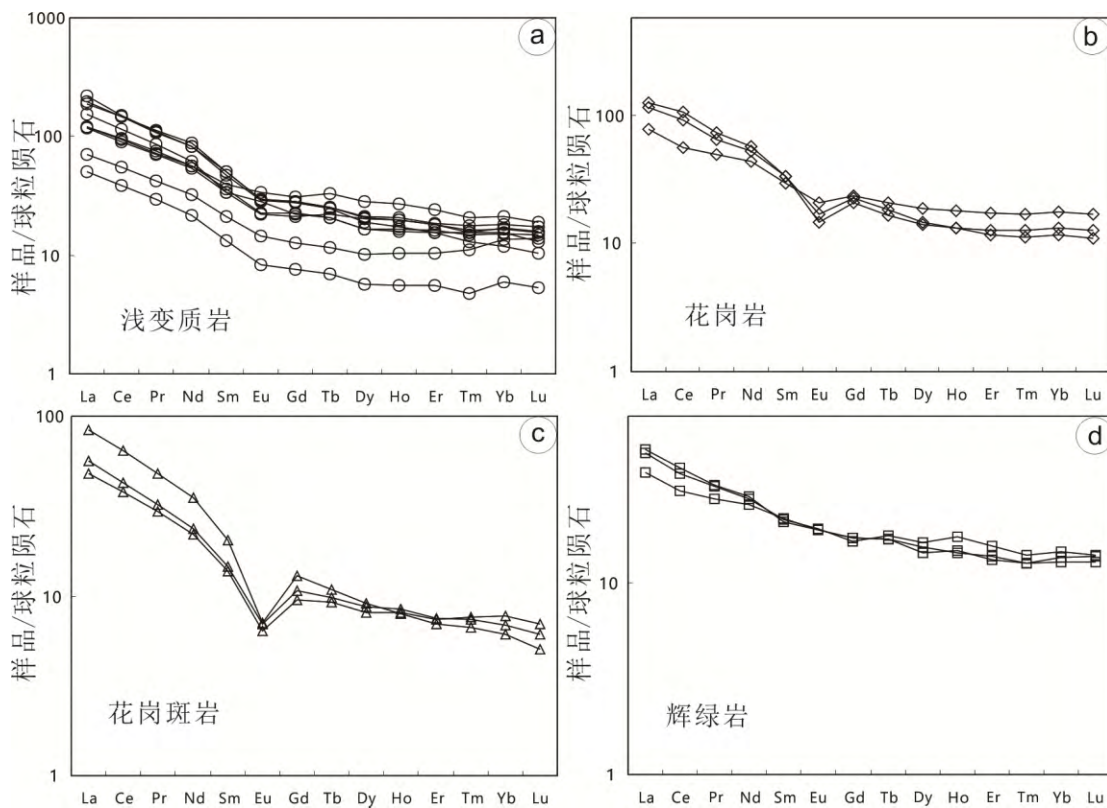


图 5 围岩及火成岩 REE 配分模式图 (转引自王珏和周家喜<sup>[18]</sup>, 据 Boynton<sup>[24]</sup>)

Fig. 5. Chondrite-normalized REE patterns for metamorphic rocks, granite, granite porphyry and diabase (cited from Wang and Zhou<sup>[18]</sup>; after Boynton<sup>[24]</sup>).

## 5.2 成矿物质来源的 Pb 同位素约束

Pb 同位素是指成矿流体中金属来源的有效手段之一，已被广泛应用于示踪成矿物质来源与演化中<sup>[15,17,20,25-28]</sup>。由于铅(锌)矿石中 Pb 含量很高，而 U、Th 含量很低，因此，其 Pb 同位素比值可以代表成矿流体的 Pb 同位素组成<sup>[17]</sup>。从全部矿石样品 Pb 同位素组成分析结果(表 2)看，铅(锌)矿石的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化范围都很窄，且比值相对稳定，表明它们具有相同的物质来源(图 6)。

在  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解(图 6a)中，全部矿石样品都在下地壳和造山带铅平均演化曲线之间<sup>[29]</sup>，围岩样品也落入这一范围，且矿石和围岩间有部分重叠，暗示赋矿岩石可能为成矿提供了物质，这与地质事实和 REE 示踪结果相吻合。在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解(图 6b)中，全部矿石样品落入

到造山带铅平均演化线附近<sup>[29]</sup>, 部分落入地幔铅平均演化线以下, 暗示成矿物质来源较为复杂, 不排除有岩浆岩的贡献。而地层样品则主要落入造山带和上地壳铅平均演化线上, 表明围岩地层 Pb 同位素组成受到了造山作用的影响。顾尚义等<sup>[13]</sup>对友能矿床相邻的那哥矿床定年研究, 表明本区(包括那哥矿床在内)多金属矿床很可能形成于加里东期(400~414 Ma), 因此, 不能排除广西造山运动对区域和矿床 Pb 同位素组成的影响。此外, 矿石和围岩样品的  $\mu$  值均大于 9.4<sup>[29]</sup>, 表明壳源岩石仍是友能矿床成矿金属来源的主要源区岩石。因此, 尽管不能排除岩浆岩提供部分成矿物质的可能性, 但可以肯定的是赋矿地层浅变质岩为成矿提供了主要金属来源, 这与浅变质岩具有高 Pb 等成矿元背景的地质事实是一致的<sup>[30]</sup>。

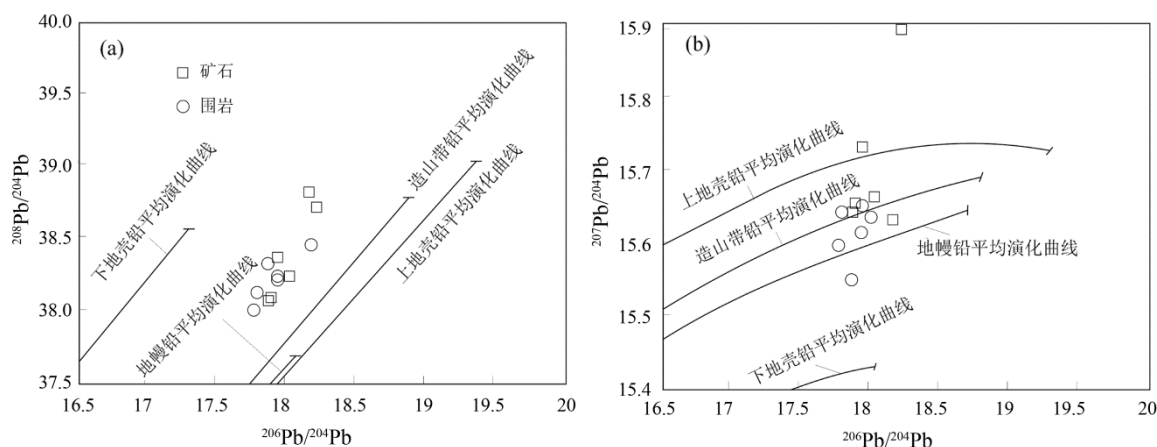


图6  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a) 和  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解(底图据 Zartman 和 Doe<sup>[29]</sup>)

Fig. 6. Plots for  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a) and  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (after Zartman and Doe<sup>[29]</sup>).

### 5.3 友能矿床成因浅析

友能铅锌矿床明显受构造控制(图1和图2), 其矿石多具有角砾状、细脉状、浸染状、和网脉状等构造(图3), 表明该矿床的后生性。本次研究显示该矿床矿石的 REE 主要继承围岩(图4和图5), 而成矿金属也主要由赋矿地层提供(图6)。可见, 新元古代地层与友能矿床铅(锌)成矿作用关系密切。由于友能矿床的赋矿围岩是乌叶组1段绢云母板岩, REE 和 Pb 同位素表明其参与了成矿。因此, 该矿床的成矿流体很可能受到变质流体的影响。那哥矿床白云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  坪年龄和等时线年龄均为 412 Ma<sup>[13]</sup>, 暗示研究区存在加里东期热事件, 加之区域经历广西运动, 不难理解宰便地区的多金属成矿与区域构造热事件有关。王劲松等<sup>[1]</sup>的研究表明, 宰便多金属成矿区成矿流体属于变质水、岩浆水和大气降水的混合水, 成矿金属 Pb 主要由变质岩石提供, 而 Cu 则来自深部, 整个成矿区成矿元素组合具有一定的分带性, 例如自东向西, 地虎—九星一带以 Fe-Cu-Au 组合、那哥以 Cu-Pb 组合, 而更靠西的友能以 Pb 为主。另外在地虎—九星、那哥和友能3个矿床 Pb 同位素相关分析图<sup>[1]</sup>上(图略), 可见它们具有明显的线性相关关系, 且从地虎—九星(东)向友能矿床(西)放射性成因 Pb 有增加的趋势。因此, 本文认为它们很可能属于同一成矿系统, 是成矿流体演化不同阶段的产物, 流体运移方向自东向西。综上, 友能矿床属于后生变质热液成因, 与区域构造热变质事件有关, 是广西运动驱动变质流体与大气降水混合的产物。

## 6 结论

友能铅锌矿床成矿物质主要来源于赋矿地层浅变质岩石, 与新元古代各类岩浆作用没有直接的成因联系, 但不排除部分成矿物质是通过水/岩相互作用由这些岩浆岩提供的。友能矿床很可能形成于加里东期, 是广西造山运动驱动区域变质流体成矿的产物, 与地虎—九星和那哥等多金属矿床很可能是同一成矿系统。



**致谢:** 野外工作得到贵州地矿局 102 地质大队王劲松教授级高工、刘永坤高工等同仁的大力支持, 实验工作得到核工业北京地质研究院刘牧老师等的帮助。成文过程与王劲松教授级高工、叶霖研究员和钱志宽副教授等进行了有益的讨论, 对他们表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献:

- [1] 王劲松, 周家喜, 刘金海, 等. 黔东南从江宰便铜铅锌多金属矿成矿作用与找矿预测[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 王尚彦, 陶平, 戴传固, 等. 贵州东部金矿[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [3] 王劲松, 周家喜, 杨德智, 等. 黔东南宰便新元古代镁铁—超镁铁质岩地球化学[J]. 矿物学报, 2010, 30(2): 215-222.
- [4] 王劲松, 周家喜, 杨德智, 等. 黔东南宰便辉绿岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 460-469.
- [5] 曾昭光, 刘灵, 舒永宽, 等. 贵州宰便—高武地区中新元古代火山岩的发现及其意义[J]. 贵州地质, 2003, 20(3): 135-138+199.
- [6] 曾雯, 周汉文, 钟增球, 等. 黔东南新元古代岩浆岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球化学, 2005, 34(6): 548-556.
- [7] 樊俊雷, 罗金海, 曹远志, 等. 黔东南新元古代花岗岩岩石的特征及其地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2010, 40(4): 672-678.
- [8] 周家喜, 陈志明, 王劲松, 等. 黔东南从江隐伏似花岗斑岩的发现及其找矿意义[J]. 矿物学报, 2011, 31(1): 160.
- [9] Wu T, Zhou JX, Wang XC, et al. Identification of ca. 850 Ma high-temperature strongly peraluminous granitoids in southeastern Guizhou Province, South China: A result of early extension along the southern margin of the Yangtze Block [J]. *Precambrian Research*, 2018, 308: 18-34.
- [10] 马思根, 何明勤, 周家喜, 等. 贵州从江地虎铜金多金属矿床微量和稀土元素地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5): 599-608.
- [11] 杨德智, 周家喜, 王劲松, 等. 黔东南从江那哥铜多金属矿床成矿流体来源 S-H-O 同位素制约[J]. 地质与勘探, 2010, 46(3): 455-461.
- [12] 刘永坤. 贵州从江宰便地区多金属矿分布规律及其成矿模式初探[J]. 贵州地质, 2017, 34(3): 169-174.
- [13] 顾尚义, 杜定全, 孙士军, 等. 黔东南那哥铜多金属矿床成矿年代学研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2013, 30(5): 27-30+65.
- [14] 刘永坤, 张均, 王超. 友能铅锌矿成矿地质特征及矿化富集规律[J]. 矿业工程研究, 2014, 29(4): 47-53.
- [15] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 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.
- [16] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 黔西北天桥铅锌矿床热液方解石 C、O 同位素和 REE 地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(1): 93-101.
- [17] Zhou J, Wang J, Yang D, et al. H-O-S-Cu-Pb Isotopic Constraints on the Origin of the Nage Cu-Pb Deposit, Southeast Guizhou Province, SW China[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2013, 87(5): 1334-1343.
- [18] 王珏, 周家喜. 黔东南从江那哥铜多金属矿床稀土元素地球化学特征[J]. 矿物学报, 2013, 33(2): 239-244.
- [19] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507-513.
- [20] Zhou J, Huang Z, Zhou M, et al. 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.
- [21] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 1-535.
- [22] Ma Y, Liu C. Trace element geochemistry during weathering as exemplified by the weathered crust of granite, Longnan, Jiangxi [J]. *Chinese. Sci. Bull.*, 1999, 44: 2260-2263.
- [23] Chen Y, Fu S. Variation of REE patterns in early Precambrian sediments: Theoretical study and evidence from the southern margin of the northern China craton [J]. *Chinese. Sci. Bull.*, 1991, 36 (13): 1100-1104.
- [24] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. *Dev Geochem*, 1984, 2: 63-114.
- [25] Zhou JX, Xiang ZZ, Zhou MF, et al. The giant Upper Yangtze Pb-Zn province in SW China: Reviews, new advances and a new genetic model [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 280-315.
- [26] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 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, 2016, 32(11): 3441-3455.
- [27] 崔银亮, 周家喜, 黄智龙, 等. 云南富乐铅锌矿床地质、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 2018, 34(1): 194-206.
- [28] 安琦, 周家喜, 徐磊, 等. 黔西北猫榨厂铅锌矿床原位 Pb 同位素地球化学[J]. 矿物学报, 2018, 38(6): 585-592.
- [29] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1-2): 135-162.
- [30] 陈芳, 周家喜, 王劲松, 等. 黔东南那哥铜多金属矿床微量元素地球化学[J]. 矿物学报, 2011, 31(3): 412-418.