

黔东北大竹园萤石矿床 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义

张遵遵¹, 龚银杰¹, 金世超¹, 漆双林², 甘金木¹, 张利国¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 中南冶金地质研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 黔东北(沿河)–渝东南(酉阳)一带广泛发育萤石、重晶石及铅锌(汞)矿化, 关于其成矿时代, 一直缺少直接的同位素年龄证据。黔东北大竹园萤石矿床位于上扬子地块东南缘, 矿体赋存于下奥陶统桐梓组和红花园组碳酸盐岩内, 受 NW 向断裂控制, 是本区热液脉型萤石矿床的代表。本文以该矿床为研究对象, 利用单矿物 Sm-Nd 等时线方法进行了成矿年龄测定, 获得萤石 Sm-Nd 等时线年龄为 436 ± 15 Ma (MSWD = 0.85), 萤石与共生方解石 Sm-Nd 等时线年龄为 430 ± 13 Ma (MSWD = 1.02), 两者在误差范围内一致, 表明矿床形成于加里东期, 该年龄与湘西–黔东 MVT 铅锌矿床成矿时代 (477 ~ 410 Ma) 一致。本区萤石–重晶石矿床与区内产出的主要铅锌(汞)矿床关系密切, 推测它们有相近的物质来源, 是在同一构造运动时期形成的一个有亲缘关系的成矿系列。研究结果指示加里东期是区内重要的萤石–重晶石–铅锌(汞)中低温热液成矿期。

关键词: 萤石矿; Sm-Nd 同位素; 大竹园; 黔东北

中图分类号: P619.21⁺5; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)06-0949-10

Sm-Nd isochron age of the Dazhuyuan fluorite deposit in northeastern Guizhou and its geological significance

ZHANG Zun-zun¹, GONG Yin-jie¹, JIN Shi-chao¹, QI Shuang-lin², GAN Jin-mu¹ and ZHANG Li-guo¹

(1. Wuhan Center of China Geological Survey, CGS, Wuhan 430205, China; 2. Central South Institute of Metallurgical Geology, Yichang 443003, China)

Abstract: Fluorite, barite and lead-zinc (mercury) minerals are widely distributed in northeastern Guizhou (Yanhe)-southeastern Chongqing (Youyang) area; nevertheless, there has been no direct isotope age evidence about the mineralization age. The Dazhuyuan fluorite deposit in the northeast of Guizhou is located at the southeast edge of the upper Yangtze block, the orebodies are hosted in the Lower Ordovician carbonate of Tongzi and Honghuayuan formations, controlled by NW-trending faults, and the deposit is the representative in the hydrothermal vein type fluorite deposits of this area. Therefore, the authors selected the deposit to carry out the dating of the mineralization by using the monomineral Sm-Nd isochron method and obtained the Sm-Nd isochron age of fluorite of 436 ± 15 Ma (MSWD = 0.85), and the age of associated calcite and fluorite assemblage of 430 ± 13 Ma (MSWD = 1.02); the two ages are consistent, indicating that the Dazhuyuan fluorite deposit was formed in Caledonian, and the ages are consistent with the ages (477 ~ 410 Ma) of the MVT lead and zinc deposits in west Hunan-east Guizhou area. The fluorite-barite deposits in this area are closely related to the main lead-zinc (mercury) deposits, and therefore the authors infer that they had the similar sources, and constituted a metallogenic series which had genetic relationship and were formed during the same tectonic movement period. All this indicates that Caledonian period was an impor-

收稿日期: 2017-12-27; 接受日期: 2018-07-16

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查项目 (DD20179232, DD20160029)

作者简介: 张遵遵 (1984-), 男, 工程师, 主要从事矿产地质调查及研究工作, E-mail: 389712477@qq.com.

tant medium-low temperature hydrothermal metallogenic period for the formation of fluorite-barite and lead-zinc (mercury) deposits.

Key words: fluorite deposit; Sm-Nd isotope; Dazhuyuan; northeastern Guizhou

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20179232, DD20160029)

在黔东北(沿河)-渝东南(酉阳)一带,分布有众多的萤石-重晶石矿床。矿体主要呈陡倾斜脉状产于下奥陶统桐梓组(O_1t)及红花园组(O_1h)碳酸盐岩内,受NW-NNW向断裂控制。张星垣(1988)、侯兵德(2011)、徐志涛等(2012)、张建忠等(2014)、张华松等(2015)、卢树藩等(2016)等对本区萤石-重晶石矿床的成矿地质特征等方面进行的调查与研究结果表明,本区萤石-重晶石矿床具有相似的成矿地质特征,其成矿受地层、岩性和断层控制明显,与岩浆活动无明显联系。潘忠华等(1994, 1996)和赵磊等(2015)对区内萤石-重晶石矿床开展了流体包裹体及同位素地球化学方面的研究,认为本区萤石-重晶石矿的成矿温度为中低温($155 \sim 260^\circ\text{C}$),成矿介质水主要来源于地层水(部分来源于大气降水),成矿流体为类似于密西西比河谷型矿床的成矿热卤水。关于本区萤石-重晶石矿床的成矿时代,目前还缺少可靠的同位素年龄证据,多数学者认为区内的萤石-重晶石矿床受褶皱构造控制,而本区加里东期运动主要发生地壳的升降,燕山期发生了强烈的造山运动,因此认为区内的萤石-重晶石等中低温热液矿床的成矿作用应发生在燕山期(张星垣, 1988; 李文炎等, 1991; 侯兵德, 2011; 张建忠等, 2014; 张华松等, 2015)。而近年来,随着同位素定年技术方法的进步,不断有学者获得湘西-黔东南地区MVT铅锌矿的成矿时代为加里东期(段其发等, 2014; 杨红梅等, 2015; 于玉帅等, 2017)。本区与湘西-黔东南地区地理位置相邻,地质演化过程相似,区内广泛发育的萤石-重晶石等中低温热液成矿作用是否也发生在加里东期?为了查明本区萤石-重晶石等中低温热液矿床的成矿时代及进一步准确地认识矿床成因与成矿机理,有必要开展一定的同位素定年工作。

Sm、Nd均为稀土元素,化学性质相近,母体(^{147}Sm)衰变形成的子体(^{143}Nd)易在矿物晶格中保存下来,Sm-Nd同位素体系易保持封闭,具有较强的抗风化、抗蚀变能力,是矿床定年的一种有效手段(彭建堂等, 2006)。热液矿床的含钙矿物如萤石、方解石等是Sm-Nd同位素定年的理想对象(Jiang *et al.*, 2000; 黄建国等, 2012; 刘协鲁等, 2014),部分

学者用萤石-方解石矿物组合也得到了可靠的Sm-Nd同位素年龄(田世洪等, 2009; Xu *et al.*, 2015)。本文选取区内代表性的大竹园萤石矿床,在矿床地质特征研究的基础上,采用单矿物Sm-Nd同位素定年的方法,对萤石及与萤石同期的方解石等含钙矿物进行了Sm-Nd同位素等时线年龄测定,以为厘定成矿时代和研究矿床成因与成矿机理等提供可靠的证据。

1 地质特征

1.1 区域地质背景及矿产特征

黔东北大竹园萤石矿床,处于上扬子地块东南缘八面山陆内变形带内,西北为四川盆地,东为雪峰隆起,北为神农架-黄陵隆起(图1a)。区内经历了雪峰、加里东、海西及印支-燕山多期运动。在该矿床区域范围内,以前震旦系板溪群为基底,古生代至中三叠世海相沉积盖层发育良好(段其发, 2014)。第一盖层震旦系至志留系:震旦系下部是以南沱冰碛岩层或浊流层为代表的冰碛-浊流层;震旦系上部至奥陶系主要为浅海碳酸盐岩建造,其中在早寒武世发生一次大规模的海侵作用,区内沉积了一套厚度约900~1200 m的黑色岩系(赵瞻等, 2011),覆盖了晚震旦世灯影期碳酸盐台地;上奥陶统至志留系为笔石页岩和泥质、粉砂质页岩建造。晚古生代本区相对隆升,部分地区由于隆升,第二盖层缺失泥盆、石炭两系,仅见二叠系至中三叠统。印支运动本区抬升为陆地,燕山运动全部褶皱,形成地台盖层褶皱带,奠定了现今的构造格局。喜马拉雅运动使晚燕山期形成的褶皱断裂进一步叠加改造,使地层遭到大量的剥蚀。本区整体呈现NNE及近SN向带状分布的褶皱构造,以复式为主,由窄向斜、宽背斜组成较典型的隔槽式褶皱。本区断裂构造十分发育,主要呈NE向,次为NNE及NW向。褶皱-断层组合中的断层多为高角度($50^\circ \sim 80^\circ$)NNE-NE向正断层和逆冲断层,与褶皱轴迹近于平行(杨忠琴等, 2016)。广大区域范围内无岩浆岩分布(图1b)。

黔东北(沿河)-渝东南(酉阳)一带,产出的

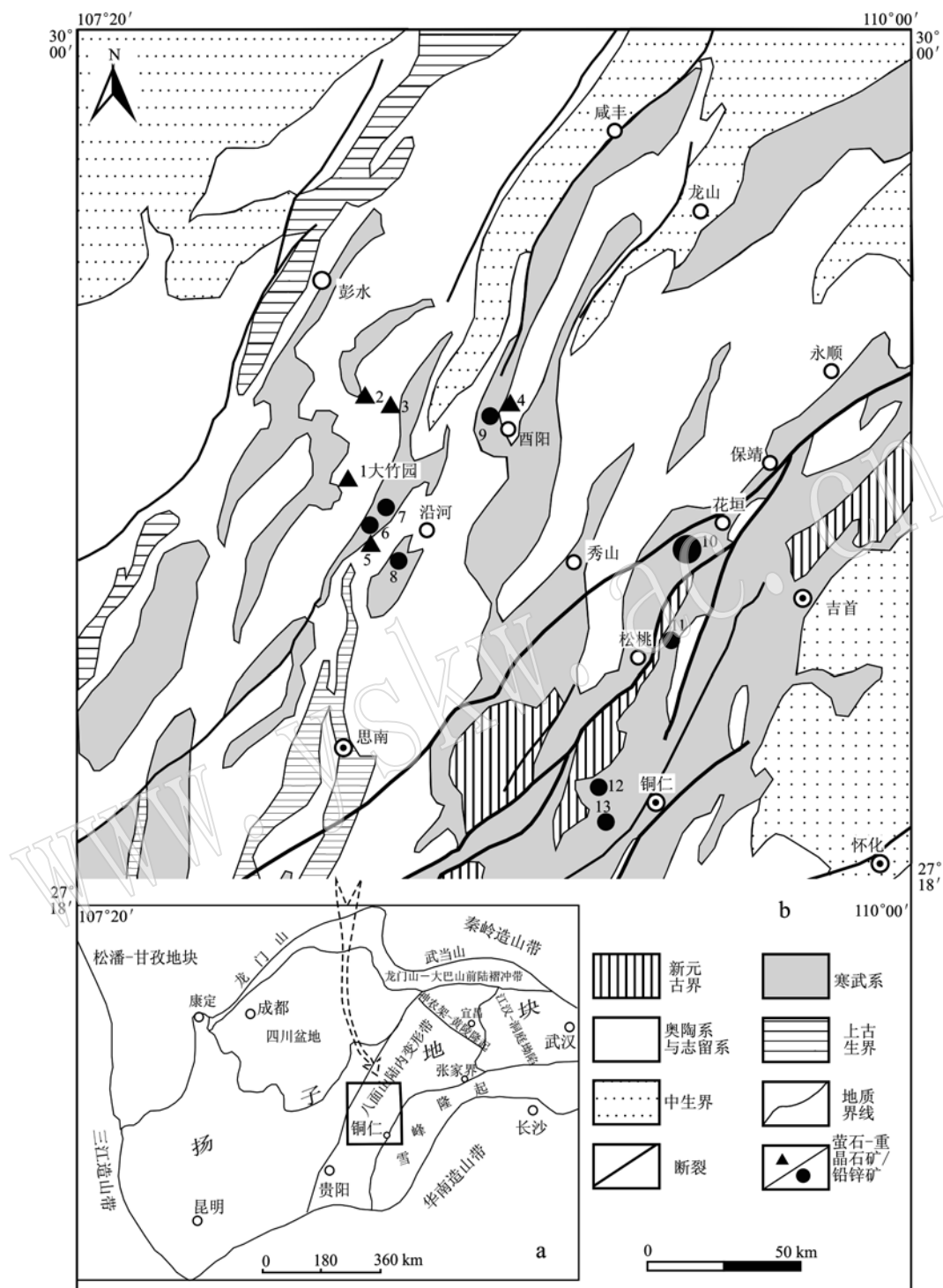


图1 黔东南-湘西地区构造位置图(a)和区域地质略图[b, 据李堃等(2014)修改]

Fig.1 Tectonic location (a) and geological sketch map (b, after Li Kun *et al.*, 2014) of northeastern Guizhou-western Hunan area

矿床名称: 1—大竹园萤石矿; 2—老虎钳重晶石矿; 3—三家田重晶石矿; 4—桂花萤石矿; 5—丰水岭萤石矿; 6—三角塘铅锌矿; 7—铅厂盖铅锌矿; 8—板场铅锌矿; 9—小坝铅锌矿; 10—花垣铅锌矿; 11—嗅脑铅锌矿; 12—卜口场铅锌矿; 13—塘边铅锌矿

Name of deposits: 1—Dazhuoyuan fluorite deposit; 2—Laohuqian barite deposit; 3—Sanjiantian barite deposit; 4—Guihua fluorite deposit; 5—Fengshuiling fluorite deposit; 6—Sanjiaotang lead-zinc deposit; 7—Qianchanggai lead-zinc deposit; 8—Banchang lead-zinc deposit; 9—Xiaoba lead-zinc deposit; 10—Huayuan lead-zinc deposit; 11—Xiunao lead-zinc deposit; 12—Bukouchang lead-zinc deposit; 13—Tangbian lead-zinc deposit

主要矿产有铅锌矿及萤石、重晶石矿等。现有的勘探成果显示,本区铅锌矿点较多,但矿床规模通常较小,铅锌矿体主要呈脉状产于中上寒武统碳酸盐岩内发育的 NE 向、NW 向或近 EW 向断层构造带内,或呈层状产于该套地层的层间软弱带内,如三角塘、板场、小坝等铅锌矿床。少部分铅锌矿点产于下奥陶统桐梓组及红花园组(O_1h)发育的 NW 向断裂或裂隙内,如淇滩、洞岩铅锌矿床。

萤石-重晶石矿是本区分布最多的矿种,矿体多呈陡倾斜脉状产于下奥陶统桐梓组及红花园组碳酸盐岩内,少数产于上寒武统及中上奥陶统碳酸盐岩内,受 NW-NNW 向断层或裂隙控制,矿体产状与断层或裂隙产状一致,矿体规模与断层或裂隙发育程度大致呈正相关。矿体在平面上常呈线状、条带状、扁豆状,横断面呈楔子状,上宽下窄,向下逐渐尖灭,局部可见呈长透镜状、似层状产出的矿体。在矿床范围内,多条矿脉常平行排列,在同一个矿脉中萤石与重晶石常互为消长关系。

1.2 矿床地质特征

大竹园萤石矿床位于贵州省沿河县黄土乡,处于金鸡岭背斜南东翼。矿区主要出露下奥陶统桐梓组(O_1t)、红花园组(O_1h)和中下奥陶统湄潭组($O_{1-2}m$) (图2a)。桐梓组为一套台地边缘浅滩碳酸盐岩夹剥坪碎屑岩,区域上出露厚度 187~257 m。上段为灰色厚层生物屑泥晶灰岩、亮晶砂屑生物碎屑灰岩夹薄-中层条带状生物碎屑灰岩及页岩;中段为砂屑白云质灰岩,粉晶砂屑白云岩夹砾屑、砂屑灰岩及少量薄层泥灰岩;下段为灰、深灰色薄-中层状泥晶灰岩、砂屑粉晶灰岩,顶部常发育数米厚的灰绿色页岩、粉砂质页岩。红花园组:为台缘生物屑滩相沉积,区域上出露厚度 30~98 m。顶部为灰色中-厚层状含泥质条带灰岩;中上部为灰色厚层状生物屑-砂屑亮晶灰岩;下部为灰色厚层-巨厚层含生物碎屑亮晶灰岩,局部夹有瘤状灰岩。湄潭组为斜坡介壳灰岩和笔石页岩混合相沉积,区域上出露厚度 198~258 m。上段为黄灰绿色薄-中厚层含云母粉砂岩与同色粉砂质页岩不等厚互层,局部夹薄-中厚层细晶灰岩;中段为灰绿及紫红色薄-中厚层瘤状泥灰岩间夹同色页岩,页岩中含顺层分布钙质扁豆体,瘤体由生物屑灰岩组成;下段为黄灰绿色页岩夹灰色薄-中层瘤状泥、粉晶含生物屑灰岩,页岩向上增厚。

大竹园萤石矿体(1号矿脉)赋存于桐梓组及红花园组NW向的张性裂隙(F_1)中(图2a),呈脉状陡

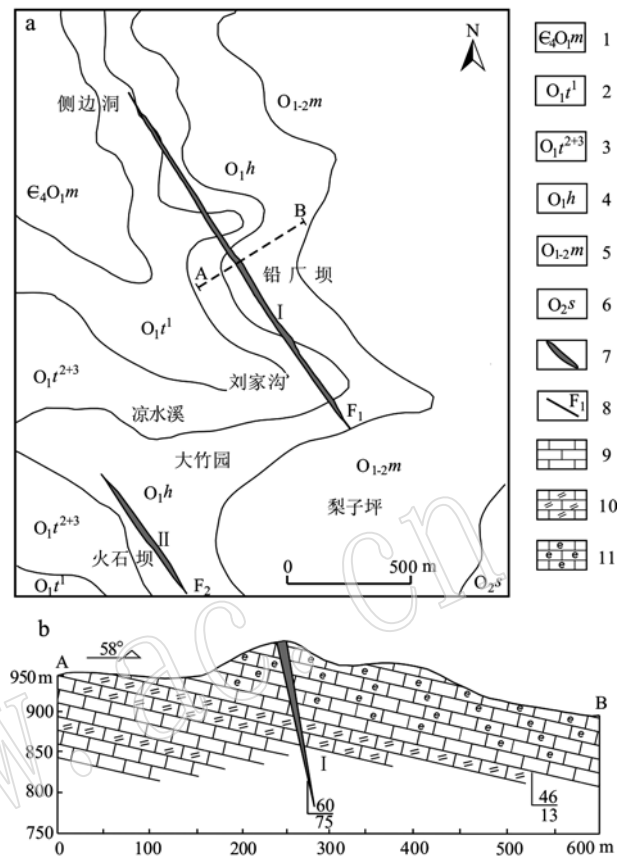


图2 大竹园萤石矿床矿区地质简图(a)及地质剖面图(b)
Fig. 2 Sketch map (a) and geological cross section (b) of the Dazhuyuan fluorite mining area

1—毛田组; 2—桐梓组一段; 3—桐梓组二三段; 4—红花园组; 5—湄潭组; 6—十字铺组; 7—矿脉; 8—裂隙; 9—灰岩; 10—白云质灰岩; 11—生物碎屑灰岩

1—Maotian Formation; 2—1st member of Tongzi Formation; 3—2nd and 3rd member of Tongzi Formation; 4—Honghuayuan Formation; 5—Meitan Formation; 6—Shizipu Formation; 7—ore vein; 8—fracture; 9—limestone; 10—dolomitic limestone; 11—bioclastic limestone

倾斜产出,与裂隙产状一致。含矿裂隙 F_1 产状 $60^\circ \angle 70^\circ \sim 82^\circ$,走向延伸约 2 km。矿脉走向长约 1.5 km,厚度 1.65~3.20 m,平均厚度 2.25 m,矿体横断面呈楔子状,上宽下窄,深部沿张性裂隙的消失而尖灭(图2b)。1号矿脉中 CaF_2 含量 72.5%~81.5%,平均为 78.0%。赋矿岩性主要为生物碎屑灰岩(图3a)、白云质灰岩及少量白云岩,矿体与围岩多为突变接触关系。矿体规模与裂隙发育程度大致呈正相关,在矿区及外围未见区域性断层出露,北西向断裂既是容矿构造,又是导矿构造。矿石以萤石为主,混生少量重晶石,脉石矿物为方解石、少量石英。萤石矿石呈无色、浅白色和紫色,少量浅绿色,重晶石矿石呈白色或乳白色。矿石具自形-半自形结晶结构,

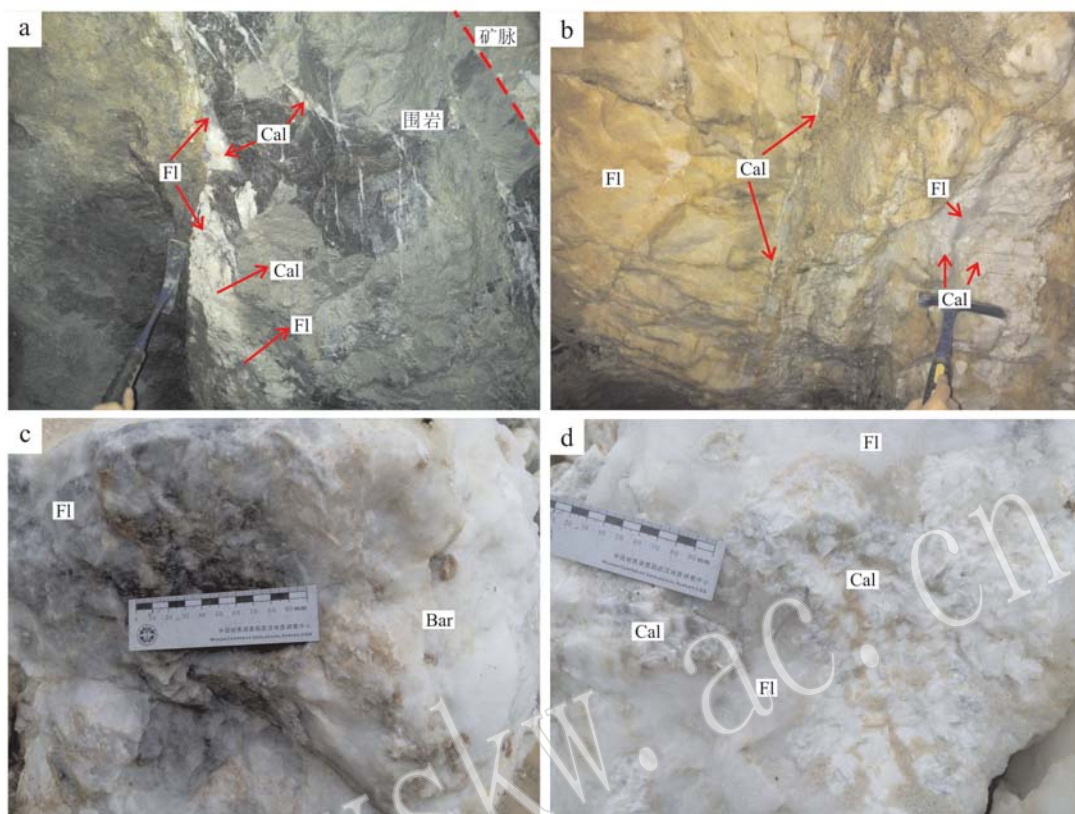


图3 大竹园萤石矿床矿石及围岩照片

Fig. 3 Photos of the ore and host rock from the Dazhuyuan fluorite deposit

a—生物碎屑灰岩, 发育萤石-方解石细脉; b—块状、条带状矿石; c—烟灰色萤石与白色重晶石呈团块状; d—无色萤石与白色方解石呈镶嵌状; Fl—萤石; Bar—重晶石; Cal—方解石

a—bioclastic limestone and developed fluorite-calcite veins; b—massive and banded ore; c—smoky-gray fluorite and white barite with blocky structure; d—colorless fluorite and white calcite with mosaic structure; Fl—fluorite; Bar—barite; Cal—calcite

块状、粒状、镶嵌状、条带状及角砾状构造(图 3b ~ 3d)。本区矿化蚀变类型较简单, 主要为方解石化、黄铁矿化、绿泥石化及少量硅化。

2 样品采集与分析方法

本次 Sm-Nd 同位素测年样品, 均采自大竹园萤石矿床相同标高的同一矿脉中(1 号矿脉), 为新鲜未风化的矿石样品。单矿物分选及 Sm、Nd 同位素测试均由国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成。具体流程如下: 首先将萤石矿石粉碎至 40 ~ 60 目, 然后在双目镜下挑选, 使其纯度达到 99% 以上, 用蒸馏水清洗挑纯的单矿物, 在低温下烘干, 然后将纯净的萤石、方解石研磨至 200 目以下。

萤石、方解石样品 Sm-Nd 同位素分析, 平行称取两份适量样品置于 Teflon 器皿中, 一份加入 $^{145}\text{Nd} + ^{149}\text{Sm}$

混合稀释剂, 另一份不加稀释剂, 用高氯酸和氢氟酸分别溶解样品, 蒸干后用稀盐酸提取并离心分离, 上层清液上 Dowex50 × 8 阳离子交换树脂进行分离和纯化, 加了稀释剂的解吸液蒸干后用于 Sm、Nd 含量质谱分析, 未加稀释剂的解吸液蒸干后继续用稀盐酸提取上 P507 有机萃取树脂柱(2-乙基己基膦酸单-2-乙基己基酯)分离和纯化 Nd, 用做 Nd 同位素比值分析。Sm、Nd 同位素组成采用热电离质谱仪 Triton 分析, Nd 同位素比值质谱分析中产生的质量分馏采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行幂定律校正, Sm、Nd 含量采用同位素稀释法公式计算得到。样品化学处理均在超净化实验室完成, 使用的器皿材质为氟塑料或高纯石英, 所用试剂为市售高纯试剂经亚沸蒸馏器蒸馏所得。整个分析过程用 GBW04419、BCR-2 和 GSW 标准物质分别对全流程和仪器进行监控。获得的 GBW04419 标准测定平均值分别为: $\text{Sm} = 3.03 \times$

10^{-6} , $Nd = 10.10 \times 10^{-6}$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512\,721 \pm 7$; BCR-2 的测定平均值分别为: $Sm = 6.57 \times 10^{-6}$, $Nd = 28.86 \times 10^{-6}$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512\,626 \pm 4$; GSW 的 $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512\,438 \pm 7$, 与其推荐值在误差范围内完全一致。全流程 Nd、Sm 空白分别为 3.1×10^{-10} 和 1.1×10^{-10} , 表明 Sm-Nd 测试数据可靠可信。用 Isoplot 计算程序, 对大竹园矿床萤石的 Sm-Nd 同位素数据进行处理, 样品 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值误差为 0.5%。

3 分析结果

对大竹园萤石矿床的萤石和方解石开展 Sm-Nd 同位素组成分析, 其结果列于表1。由表1可以看出

表1 大竹园萤石矿床萤石及方解石的 Sm-Nd 同位素组成

Table 1 Sm-Nd isotopic analyses of fluorite and calcite from the Dazhuyuan fluorite deposit

样号	样名	$w(Sm)/10^{-6}$	$w(Nd)/10^{-6}$	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd(2\sigma)$
G13-B1	萤石	0.127 9	0.438 7	0.176 4	0.512 000 ± 10
G13-B4	萤石	0.108 3	0.384 1	0.170 7	0.511 994 ± 10
G13-B2	萤石	0.114 9	0.413 4	0.168 1	0.511 991 ± 10
G13-B8	萤石	0.099 4	0.388 7	0.154 7	0.511 954 ± 9
G13-B13	萤石	0.283 5	1.217 0	0.140 9	0.511 920 ± 5
G13-B9	萤石	0.107 7	0.485 6	0.134 1	0.511 900 ± 9
G13-B7	萤石	0.195 4	0.902 5	0.131 0	0.511 882 ± 7
G13-B10	萤石	0.297 0	1.495 0	0.120 2	0.511 855 ± 8
DZY-8	萤石	0.323 4	1.801 0	0.108 6	0.511 819 ± 3
DZY-3	方解石	1.017 0	5.098 0	0.120 7	0.511 856 ± 7
G13-B7-2	方解石	0.960 8	5.776 0	0.100 6	0.511 811 ± 5

萤石、方解石的 Sm、Nd 含量均较低, 萤石的 Sm、Nd 含量范围分别为 $(0.099 \sim 0.323) \times 10^{-6}$ 和 $(0.384 \sim 1.801) \times 10^{-6}$; 两件方解石的 Sm、Nd 含量较萤石高, Sm、Nd 含量范围分别为 $(0.96 \sim 1.02) \times 10^{-6}$ 和 $(5.10 \sim 5.78) \times 10^{-6}$ 。萤石、方解石的 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 值范围为 0.100 6 ~ 0.176 4, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值范围为 0.511 811 ~ 0.512 009。

9 件萤石样品获得的 Sm-Nd 等时线年龄为 436 ± 15 Ma (MSWD = 0.85), $^{143}Nd/^{144}Nd$ 初始比值为 $0.511\,510 \pm 0.000\,013$ (图 4a)。9 件萤石样品与 2 件方解石样品获得的 Sm-Nd 同位素等时线年龄为 430 ± 13 Ma (MSWD = 1.02), $^{143}Nd/^{144}Nd$ 初始比值为 $0.511\,516 \pm 0.000\,011$ (图 4b)。两条等时线的斜率大体一致, 对应的等时线年龄在误差范围内基本吻合。

在 $^{147}Sm/^{144}Nd - 1/Sm$ 和 $^{143}Nd/^{144}Nd - 1/Nd$ 关系图解(图 5)中, 可以看出 9 件萤石样品的 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 与其 $1/Sm$ 及 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 与其 $1/Nd$ 之间并不具有显著的线性关系, 说明从数据拟合角度讲, 图 4 给出的 Sm-Nd 等时线不是假等时线, 而应具有等时线意义。因此, 本次测定的 Sm-Nd 等时线年龄 (436 ± 15 Ma 和 430 ± 13 Ma) 应代表其成矿时间, 即大竹园萤石矿床应形成于早志留世(加里东运动晚期)。

4 讨论及地质意义

4.1 成矿时代可靠性讨论

根据前人(张星垣, 1988; 李文炎等, 1991; 侯

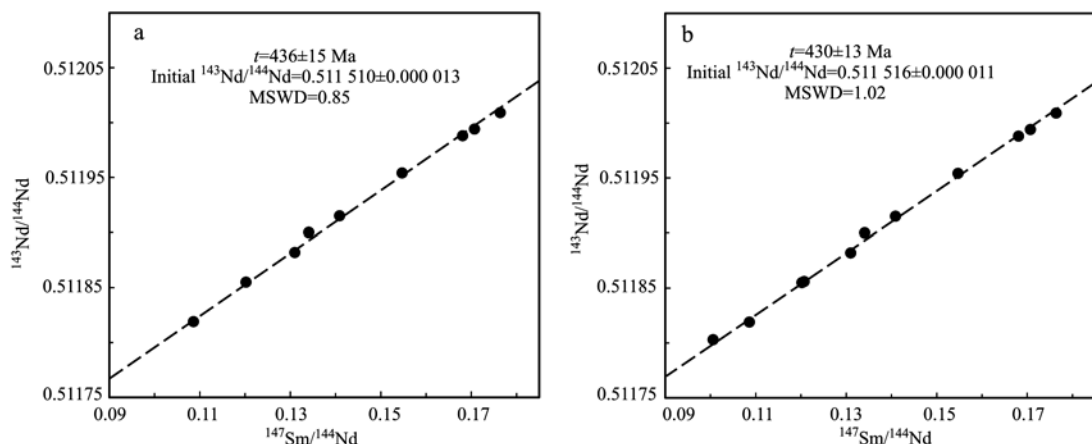


图4 大竹园萤石矿床萤石 Sm-Nd 等时线(a)、萤石和方解石 Sm-Nd 等时线(b)图解

Fig. 4 Sm-Nd isochrons of fluorite (a) and fluorite-calcite pair (b) from the Dazhuyuan fluorite deposit

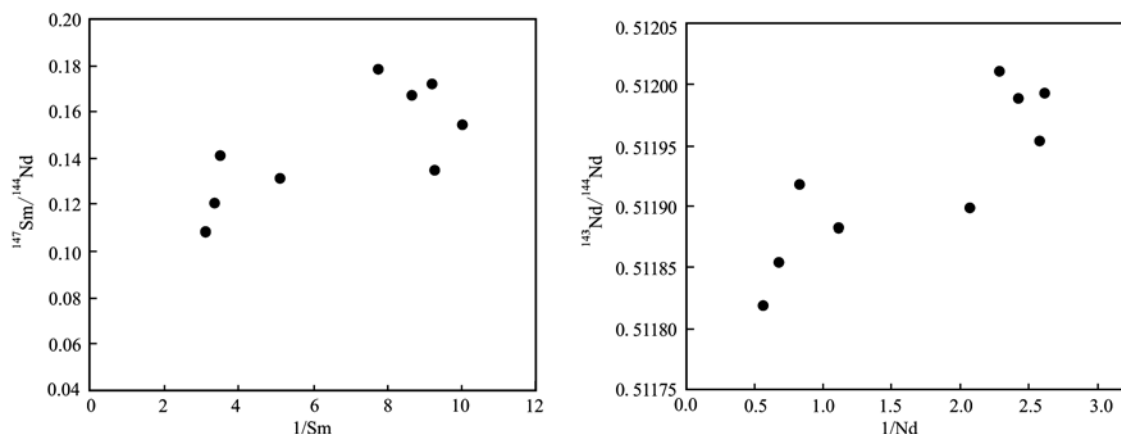


图5 大竹园萤石矿床萤石 $1/\text{Sm} - {}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd}$ 和 $1/\text{Nd} - {}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd}$ 关系图

Fig. 5 Diagrams of $1/\text{Sm}$ versus ${}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd}$ and $1/\text{Nd}$ versus ${}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd}$ of fluorite from the Dazhuyuan fluorite deposit

兵德, 2011; 徐志涛等, 2012; 张建忠等, 2014; 张华松等, 2015; 邹灏等, 2016)的研究成果, 黔东南(沿河)-渝东南(酉阳)一带的萤石-重晶石矿具有相对一致的成矿地质地球化学特征。萤石-重晶石矿体多呈陡倾斜脉状产于下奥陶统桐梓组及红花园组碳酸盐岩内, 受 NW-NNW 向断裂或裂隙控制, 成矿温度为中低温($155 \sim 260^\circ\text{C}$), 重晶石的硫同位素均属重型硫($\delta^{34}\text{S}$ 主要为 $+23\text{‰} \sim +36\text{‰}$), 成矿流体为类似于密西西比河谷型矿床的成矿热卤水等, 推测区内萤石-重晶石成矿作用可能受控于同一构造热流体场, 是同期形成的。由于本区一直缺乏直接的同位素年代学数据, 矿床形成时代仅依靠控矿构造的时代来确定, 而本区燕山期发生了强烈的造山运动, 形成了密集的地台盖层褶皱带, 之前的构造运动的形迹多被淹没或改造, 因此长期以来, 燕山运动被当作本区显生宙以来唯一的一次褶皱运动, 并认为本区的萤石-重晶石矿化受燕山期褶皱构造控制, 成矿时代应为燕山期(张星垣, 1988; 李文炎等, 1991; 侯兵德, 2011; 张建忠等, 2014; 张华松等, 2015)。而本次获得的大竹园萤石矿的 Sm-Nd 同位素等时线年龄为早志留世, 说明矿床形成于加里东运动晚期。

成矿地质背景及成矿特征方面: ① 本区区域构造主要表现为燕山期形成的 NNE 向褶皱-断裂系, 主要特征是背斜相对宽缓, 向斜相对紧闭。通常寒武系构成背斜核部, 两翼为奥陶系、志留系等, 萤石-重晶石矿脉的产出主要受奥陶系碳酸盐岩及 NW-NNW 向断裂或裂隙控制, 而背斜核部奥陶系及以上层位多被剥蚀, 萤石-重晶石矿主要产于背斜的两

翼, 且两侧多对应产出, 因此本区萤石-重晶石矿化并不是受燕山期褶皱控制, 而是受控于特定层位。② 赋矿岩层(下奥陶统碳酸盐岩)中, 发育的 NW-NNW 向断裂或裂隙构造, 不仅是萤石-重晶石的容矿构造, 同时也是导矿、配矿构造, 而受区域性 NNE、NE 向大断裂构造控制不甚明显。另外本区发育的 NNE-NE 向张扭性正断层, 在它们通过的某些矿区, 表现出与成矿无关, 或者还有一定的破坏作用, 如两置三家田 NNW 向重晶石矿脉及小坝高岩头 NNW 向萤石矿脉被该类断层错断; 红花岭萤石-重晶石矿区内的 NNW 向矿脉, 距此类断裂数米而尖灭, 远离断裂矿脉增厚; 个别矿区见 NNW 向矿脉被后期断层错开, 表现出明显的错位现象(如老虎钳重晶石矿)。③ 本区萤石-重晶石矿的主要赋矿层位为下奥陶统, 在上寒武统及中上奥陶统也见有萤石-重晶石矿化, 未在志留系以新的地层中发现过萤石-重晶石矿化, 这些热液矿化严格地限定在加里东构造层, 控矿断层也限定在加里东构造层。④ 戎嘉余等(2011)根据志留纪最初期务川、沿河等地区发育多处古岛并引起黔东南和黔北的很多地方发生沉积缺失现象, 认为本区在华南大地构造活动的控制下, 于志留纪初期出现了快速差异性的非处于匀变状态的隆升作用。差异性隆升可以引起脆性岩层产生断层或裂隙, 并引起流体的迁移, 为成矿提供了可能。⑤ 加里东期运动虽说在本区主要表现为地层的升降, 但是紧邻加里东期的黔东南前陆褶皱带, 在沿河-毕节的 NE 向宽缓带内, 分布着不少 NE 向的宽缓短轴状高隆起, 并出露了该区的最老地层, 而燕山期形成的 SN 向隔槽式褶皱与它们呈明显的跨越关系(王华云,

1993)。因此,根据本文获得的大竹园萤石矿的 Sm-Nd 同位素等时线年龄及本区萤石-重晶石矿的成矿地质背景及地质特征,认为本区萤石-重晶石矿成矿时代应为加里东期,燕山期构造仅起到破坏或改造作用。

4.2 地质意义

本文获得的大竹园萤石矿成矿年龄为早志留世,不仅打破了多数学者对本区萤石-重晶石等中低温热液矿床成矿时代的认识,还暗示了本区主要铅锌矿床的成矿时代可能与区内萤石-重晶石矿床的成矿时代一致,同为加里东期。首先,王华云(1993)得出本区三角塘铅锌矿床的铅同位素模式年龄为 468.8 Ma,且与黔东其它铅锌矿床的铅同位素模式年龄接近,其通过矿铅在岩铅演化曲线上的分布特点,认为矿铅从矿源铀铅体系分离出去的时期约在 437~433 Ma 以前,表明成矿发生在加里东晚期。其次,近年来随着同位素定年技术方法的成熟,段其发等(2014)获得了湘西花垣狮子山铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄为 410 ± 12 Ma;杨红梅等(2015)获得了黔东卜口场铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄为 466 ± 13 Ma,方解石 Sm-Nd 等时线年龄为 422 ± 48 Ma;于玉帅等(2017)获得了黔东塘边铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄为 477 ± 5 Ma。由于本区与毗邻的湘西-黔东地区具有相似的构造演化背景,并且赋存于寒武系层位中的三角塘、板场等铅锌矿床在成矿地质特征上,以及铅锌矿物的成因矿物学特点等,与湘西-黔东主要铅锌矿床颇为相近(王华云, 1993),因此,这些矿床的成矿年龄对本区铅锌等中低温热液矿床的成矿时代具有一定的指示意义。本次获得的大竹园萤石矿成矿年龄为 436~430 Ma,与湘西-黔东主要铅锌矿床的成矿时代(477~410 Ma)接近,说明加里东期,从湘西-黔东一带至本区,均发生了强烈的中低温热液成矿作用。值得指出的是,本区在燕山期 NE 向区域性正断层(钟南断层)中见铅锌矿化现象,并在其派生的 NW 向断裂破碎带内产出有铅锌矿脉(洞岩铅锌矿),说明本区除加里东期成矿外,燕山期也有铅锌成矿作用。

本区广泛分布的萤石-重晶石矿,与区内产出的主要铅锌(汞)矿关系密切。首先,它们在产出层位上具有明显的垂直分带特征,萤石-重晶石矿主要分布在下奥陶统碳酸盐岩内,而铅锌(汞)矿主要分布在上寒武统清虚洞组碳酸盐岩内,在垂向上由下到上构成一个铅锌、汞系列(下)和萤石-重晶石系列

(上)的垂直分带。其次,在铅锌矿矿石中常见重晶石、萤石等脉石矿物或紧邻铅锌矿体产有重晶石(萤石)脉体(如酉阳铅厂盖铅锌矿),在萤石-重晶石矿区常伴有铅、锌元素异常或铅锌矿化(如沿河魏家庄萤石矿、酉阳桂花萤石矿)。推测两者在成矿流体来源上一致或属于同一成矿热液体系。在成矿物质来源上,据雷义均等(2013)、双燕等(2014)、李堃等(2014)、赵磊等(2015)、邹灏等(2016)、张遵遵等(2018),本区及湘西-黔东一带的铅锌、萤石-重晶石等中低温热液矿床的成矿物质,可能主要来源于深部下寒武统牛蹄塘组-明心寺组的 Mo、V、Pb、Zn、Ba、F 等多元素富集层。因此,笔者认为本区萤石-重晶石矿床与区内主要的铅锌(汞)矿床具有相近的物质来源,是在同一构造运动时期(加里东期)形成的一个有亲缘关系的成矿系列。由于铅锌(汞)矿与萤石、重晶石矿在成矿物理化学条件上的差异,因而在空间上形成了具有一定生成顺序和分布规律且密切伴生的矿床。

5 结论

(1) 黔东北大竹园萤石矿床萤石的 Sm-Nd 等时线年龄为 436 ± 15 Ma (MSWD = 0.85), 萤石与共生方解石的 Sm-Nd 等时线年龄为 430 ± 13 Ma (MSWD = 1.02), 两者在误差范围内一致,说明大竹园萤石矿形成于早志留世,为加里东晚期成矿。

(2) 黔东北大竹园萤石矿床成矿年龄为早志留世,与湘西-黔东 MVT 铅锌矿床成矿时代(477~410 Ma)一致,均形成于加里东期。萤石-重晶石矿床与区内产出的主要铅锌(汞)矿床关系密切,推测它们有相近的物质来源,是在同一构造运动时期形成的一个有亲缘关系的成矿系列,指示加里东期是区内重要的萤石-重晶石-铅锌(汞)中低温热液成矿期。

致谢 在野外地质调查期间得到了何祥矿长的大力支持和热心帮助,两位匿名评审人提出了诸多宝贵而中肯的意见,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Duan Qifa. 2014. The Research of the Metallogenic Regularity of Stratabound Zinc-lead Deposits from Sinian-Cambrian in the Western Hunan and Eastern Hubei[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).

- Duan Qifa, Cao Liang, Zeng Jiankang, *et al.* 2014. Rb-Sr dating of sphalerites from Shizishan Pb-Zn deposit in huayuan ore concentration area western Hunan, and its geological significance[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 39(8): 977 ~986(in Chinese with English abstract).
- Hou Bingde. 2011. Geological characteristics and genesis analyses of Fengshuiling fluorite deposit in Yanhe[J]. *West-China Exploration Engineering*, (5): 149 ~154(in Chinese with English abstract).
- Huang Jianguo, Li Hujie, Li Wenjie, *et al.* 2012. Trace element characteristics of fluorite and its Sm-Nd isotopic dating in Getang gold deposit, Guizhou Province[J]. *Advances in Earth Science*, 27(10): 1087 ~1093(in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoyong, Slack John F and Palmer Martin R. 2000. Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia[J]. *Geology*, 28(8): 751 ~754.
- Lei Yijun, Dai Pingyun, Duan Qifa, *et al.* 2013. Constraints of lead-zinc source bed to lead-zinc deposits in western Hubei to Northwestern Hunan[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 33(1): 1 ~6(in Chinese with English abstract).
- Li Kun, Wu Changxiong, Tang Chaoyang, *et al.* 2014. Carbon and oxygen isotopes of Pb-Zn ore deposits in western Hunan and eastern Guizhou Provinces and their implications for the ore-forming process [J]. *Geology in China*, 41(5): 1 608 ~1 619(in Chinese with English abstract).
- Li Wenyan and Yu Hongyun. 1991. *The Barite Deposits of China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~104(in Chinese with English abstract).
- Liu Xielu, Wang Yitian, Hu Qiaoqing, *et al.* 2014. Sm-Nd isotopic dating of carbonate minerals, from the Chaima gold deposit in the Fengxian-Taibai concentration area, Shaanxi Province and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 271 ~280(in Chinese with English abstract).
- Lu Shufan and He Yongzhong. 2016. The interface controlling characteristic and prospecting significance of Wuchuan-Yanhe area fluorite (barite) mine in northern Guizhou province [J]. *Geology of Guizhou*, 33(2): 96 ~100(in Chinese with English abstract).
- Pan Zhonghua and Fan Delian. 1994. Fluid inclusion study of vein fluorite and barite ore in southeast Sichuan[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 14(4): 9 ~16(in Chinese with English abstract).
- Pan Zhonghua and Fan Delian. 1996. Isotope geochemistry of vein fluorite and barite deposits in Southeast Sichuan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 127 ~136(in Chinese with English abstract).
- Peng Jiantang, Fu Yazhou, Yuan Shunda, *et al.* 2006. Sm-Nd isotope dating of some Ca-bearing minerals in hydrothermal deposits [J]. *Geological Review*, (05): 662 ~667(in Chinese with English abstract).
- Rong Jiayu, Chen Xu, Wang Yi, *et al.* 2011. Northward expansion of Central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications[J]. *Sci. Sin. Terrae*, 41(10): 1 407 ~1 415(in Chinese with English abstract).
- Shuang Yan, Fu Shaohong, Zhu Zhengjie, *et al.* 2014. Sulfur and lead isotopic geochemistry and its significance for ore-forming material of the Shidi Pb-Zn Deposit in Xiushan, Southeast Chongqing[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 34(4): 496 ~502(in Chinese with English abstract).
- Tian Shihong, Yang Zhusen, Hou Zengqian, *et al.* 2009. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmozhaizhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 747 ~758(in Chinese with English abstract).
- Wang Huayun. 1993. Geochemistry of Pb-Zn mineralization in Guizhou [J]. *Geology of Guizhou*, 10(4): 272 ~290(in Chinese with English abstract).
- Wang Huayun, Liang Fuliang, Zeng Dingquan, *et al.* 1996. *Zinc-lead Geology in Guizhou Province*[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1 ~174(in Chinese with English abstract).
- Xu Wengang, Fan Hongrui, Hu Fangfang, *et al.* 2015. Geochronology of the Guilaizhuang gold deposit, Luxi Block, eastern North China Craton: Constraints from zircon U-Pb and fluorite-calcite Sm-Nd dating[J]. *Ore Geology Reviews*, 65(1): 390 ~399.
- Xu Zhitao, Huang Wei, Hu Xinzong, *et al.* 2012. Geological characteristics and prospecting potential of deposits of fluorite & barite in Youyang-Pengshui region, Chongqing City[J]. *Resources Environment & Engineering*, 26(1): 5 ~10(in Chinese with English abstract).
- Yang Hongmei, Liu Chongpeng, Duan Ruichun, *et al.* 2015. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Bokouchang Pb-Zn Deposit in Tongren, Guizhou Province and their geological implication[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(5): 855 ~865(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhongqin, Zhao Lei, He Yongzhong, *et al.* 2016. Geochemical characteristics of rare earth elements and genesis of fluorite deposits in Yanhe, Guizhou[J]. *Geology of Guizhou*, 33(3): 199 ~204(in Chinese with English abstract).
- Yu Yushuai, Liu Asui, Dai Pingyun, *et al.* 2017. The metallogenic epoch and ore-forming material source of the Tangbian Pb-Zn deposit in Tongren, Guizhou Province: Evidence from Rb-Sr dating of sphalerites and S-Pb isotope[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 885 ~892(in Chinese with English abstract).
- Zhang Huasong, Yang Man, Ge Chen, *et al.* 2015. Geological characteristics and genesis of Fengshiling fluorite and barite deposit in Yanhe [J]. *West-China Exploration Engineering*, (11): 153 ~156(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianzhong, Zuo Yalin and Chen Yuanxing. 2014. Geological char-

- acteristics and prospecting prospect analyses of fluorite-Barite deposits in Northern Yanhe of Guizhou[J]. West-China Exploration Engineering, (10): 153 ~ 157(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xingyuan. 1988. Barite and fluorite stratabound deposits in southeastern Sichuan and ore-controlling geological conditions[J]. Regional Geology of China, (4): 369 ~ 373(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zunzun, Gong Yinjie, Chen Libo, *et al.* 2018. Geochemical evidence of the source of ore-forming materials from Dazhuyuan fluorite deposit in northeastern Guizhou[J]. Geochimica, 47(3): 295 ~ 305(in Chinese with English abstract).
- Zhao Lei, Yang Zhongqin, He Yongzhong, *et al.* 2015. Fluid inclusion characteristics of fluorite deposit in Wuchuan-Yanhe area of Guizhou[J]. Guizhou Geology, 32(3): 196 ~ 202(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhan, Xie Yuan, Liu Jianqing, *et al.* 2011. REE geochemical signatures and sedimentary environments of the Lower Cambrian black rock series in southeastern Chongqing and its adjacent areas[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 31(2): 49 ~ 54(in Chinese with English abstract).
- Zou Hao, Dan Yong, Zhang Shouting, *et al.* 2016. Geochemical evidence for sources of ore-forming material of barite-fluorite deposits in Pengshui Area, Southeast Chongqing[J]. Geotectonica et Metallogenia, 40(1): 71 ~ 85(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 段其发. 2014. 湘西-鄂西地区震旦系-寒武系层控铅锌矿成矿规律研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉).
- 段其发, 曹亮, 曾健康, 等. 2014. 湘西花垣矿集区狮子山铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年及地质意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 39(8): 977 ~ 986.
- 侯兵德. 2011. 沿河丰水岭萤石矿地质特征及成因浅析[J]. 西部探矿工程, (5): 149 ~ 154.
- 黄建国, 李虎杰, 李文杰, 等. 2012. 贵州戈塘金矿萤石微量元素特征及钐-钕测年[J]. 地球科学进展, 27(10): 1 087 ~ 1 093.
- 雷义均, 戴平云, 段其发, 等. 2013. 鄂西-湘西北地区铅锌矿源层对铅锌矿床产出定位的制约[J]. 桂林理工大学学报, 33(1): 1 ~ 6.
- 李堃, 吴昌雄, 汤朝阳, 等. 2014. 湘西黔东地区铅锌矿床 C、O 同位素地球化学特征及其对成矿过程的指示[J]. 中国地质, 41(5): 1 608 ~ 1 619.
- 李文炎, 余洪云. 1991. 中国重晶石矿床[M]. 北京:地质出版社, 1 ~ 104.
- 刘协鲁, 王义天, 胡乔青, 等. 2014. 陕西省凤太矿集区柴金矿床碳酸盐矿物的 Sm-Nd 同位素测年及意义[J]. 岩石学报, 30(1): 271 ~ 280.
- 卢树藩, 贺永忠. 2016. 黔北务川-沿河萤石(重晶石)矿床界面控矿特征及其找矿意义[J]. 贵州地质, 33(02): 96 ~ 100.
- 潘忠华, 范德康. 1994. 川东南脉状萤石-重晶石矿床流体包裹体研究[J]. 矿物岩石, 14(4): 9 ~ 16.
- 潘忠华, 范德康. 1996. 川东南脉状萤石-重晶石矿床同位素地球化学[J]. 岩石学报, 12(1): 127 ~ 136.
- 彭建堂, 符亚洲, 袁顺达, 等. 2006. 热液矿床中含钙矿物的 Sm-Nd 同位素定年[J]. 地质论评, (5): 662 ~ 667.
- 戎嘉余, 陈旭, 王怪, 等. 2011. 奥陶-志留纪之交黔中大陆的变迁: 证据与启示[J]. 中国科学:地球科学, 41(10): 1 407 ~ 1 415.
- 双燕, 付绍洪, 朱正杰, 等. 2014. 渝东南秀山石堤铅锌矿 S、Pb 同位素地球化学特征及成矿物质来源探讨[J]. 矿物学报, 34(4): 496 ~ 502.
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等. 2009. 玉树地区东莫扎拉和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(6): 747 ~ 758.
- 王华云. 1993. 贵州铅锌矿的地球化学特征[J]. 贵州地质, 10(4): 272 ~ 290.
- 王华云, 梁福琼, 曾鼎权, 等. 1996. 贵州铅锌矿地质[M]. 贵阳:贵州科技出版社, 1 ~ 174.
- 徐志涛, 黄蔚, 胡新中, 等. 2012. 重庆市酉阳-彭水地区萤石、重晶石矿床地质特征与找矿前景[J]. 资源环境与工程, 26(1): 5 ~ 10.
- 杨红梅, 刘重瓦, 段瑞春, 等. 2015. 贵州铜仁卜口场铅锌矿床 Rb-Sr 与 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 39(5): 855 ~ 865.
- 杨忠琴, 赵磊, 贺永忠, 等. 2016. 贵州沿河萤石矿稀土元素地球化学特征及成因探讨[J]. 贵州地质, 33(3): 199 ~ 204.
- 于玉帅, 刘阿睢, 戴平云, 等. 2017. 贵州铜仁塘边铅锌矿床成矿时代和成矿物质来源——来自 Rb-Sr 同位素测年和 S-Pb 同位素的证据[J]. 地质通报, 36(5): 885 ~ 892.
- 张华松, 杨曼, 葛辰, 等. 2015. 沿河丰水岭萤石重晶石矿床地质特征及成因探讨[J]. 西部探矿工程, (11): 153 ~ 156.
- 张建忠, 左亚林, 陈远兴. 2014. 贵州沿河北部地区萤石-重晶石矿地质特征及找矿前景分析[J]. 西部探矿工程, (10): 153 ~ 157.
- 张星垣. 1988. 川东南重晶石-萤石层控矿床的地质构造特征[J]中国区域地质, (4): 369 ~ 373.
- 张遵遵, 龚银杰, 陈立波, 等. 2018. 黔东北沿河大竹园萤石矿床成矿物质来源探讨: 地球化学制约[J]. 地球化学, 47(3): 295 ~ 305.
- 赵磊, 杨忠琴, 贺永忠, 等. 2015. 贵州省务川-沿河地区萤石矿床流体包裹体特征[J]. 贵州地质, 32(3): 196 ~ 202.
- 赵瞻, 谢渊, 刘建清, 等. 2011. 渝东南下寒武统黑色岩系稀土元素地球化学特征与沉积环境[J]. 沉积与特提斯地质, 31(2): 49 ~ 54.
- 邹灏, 谈永, 张寿庭, 等. 2016. 重庆东南部彭水地区重晶石-萤石矿床的成矿物质来源探讨: 地球化学证据[J]. 大地构造与成矿学, 40(1): 71 ~ 85.