

川西南马边地区永红萤石矿床地质特征、成因类型 及其开发利用价值

文俊^{1,2,3}, 赵伟^{1,2}, 李复勇¹, 竹合林^{1,2}, 张航飞^{1,2}, 张金元^{1,2}

(1. 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队, 四川 乐山 614000; 2. 四川省地质矿产勘查开发局张金元劳模创新工作室, 四川 乐山 614000; 3. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059)

摘要:四川地区属于缺乏萤石矿和无萤石成矿区带分布的地区, 本次在马边地区发现中型萤石矿床, 具有重大的意义。通过野外地质调查和收集分析地质资料, 探讨了马边地区永红萤石矿床的矿床成因以及对区域找矿的启示。结果表明, 矿体产出于寒武系组芬兰统筇竹寺组粉砂岩中, 严格受断层控制, 成矿要素为白云岩、灰岩、含氟磷块岩和断裂, 无火山岩和侵入岩, 而前人总结的热液充填型萤石矿床中的5种亚类型均有火山岩或侵入岩, 因此本次总结为另一种热液充填型萤石矿床亚类型——永红式热液充填型萤石矿(断裂+碳酸盐岩+含氟磷酸盐); 马边地区永红萤石矿查明资源量45.0万t, CaF_2 平均品位34.61%, 为中型萤石矿床; 经选矿实验研究, 经一次粗选和七次精选, 可获得产率为26.17%, 品位为91.35%, 回收率61.34%的萤石精矿, 可选性较好, 属于易选矿石; 通过成矿要素对比分析, 峨边-金阳大断裂带上的马边、雷波、金阳地区具有较好的萤石找矿前景, 以上成果对填补四川无萤石成矿带的空白和指导峨边-金阳大断裂带的区域找矿及推动乌蒙山区经济发展都具有重要意义。

关键词: 萤石矿; 峨边-金阳大断裂; 筇竹寺组; 灯影组; 热液充填型; 开发利用价值

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.001

中图分类号: P611.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)01-0001-09

萤石又称氟石(CaF_2), 《全国矿产资源规划(2016~2020年)》将其列入战略性矿产名录, 是工业中氟元素的主要来源, 广泛应用于氟化工行业及新能源、生物、节能环保、新能源汽车等战略性新兴产业^[1-3]。我国萤石资源丰富^[4-5], 根据自然资源部《2018年全国矿产资源储量汇总表》中的统计数据, 截止2018年已查明的萤石资源储量2.57亿t^[6]。近年来, 随着中国萤石应用领域的不断扩大, 对萤石矿产的需求呈快速增长趋势, 预计萤石2030年需求量达567.9万t^[1], 加之目前的国际矿业供需形势不稳, 因此值得加大勘查和研究力度。

萤石矿是中国的优势矿种, 主要分布在浙江、内蒙古、湖南、江西、福建、河南等省区,

大中型萤石矿床集中于东部沿海、华中和内蒙古中东部^[2]。王吉平等^[7]将中国萤石矿床划分为沉积改造型、热液充填型和伴生型等3种矿床类型, 并进一步划分为11个矿床式(亚类型), 其中热液充填型划分为七坝泉式热液充填型萤石矿(侵入岩+断裂)、武义式热液充填型萤石矿(火山岩+断裂)、八面山式热液充填型萤石矿(灰岩+断裂+侵入岩)、湖山式热液充填型萤石矿(火山岩+侵入岩(次火山岩)+断裂)、双江口式热液充填型萤石矿(侵入岩+断裂+灰岩(捕虏体))等5种矿床式; 经研究发现, 马边永红萤石矿床的成矿要素仅有断裂和碳酸盐岩, 无侵入岩和火山岩的作用, 本次总结出另一种王吉平等未系统归纳的热液充填型矿床式——永红式热液

收稿日期: 2021-12-29

作者简介: 文俊(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事区域地质调查与战略性矿产调查研究。

通信作者: 赵伟(1970-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事区域地质调查与矿产勘查研究。

充填型萤石矿（断裂+碳酸盐岩（灰岩、白云岩）+磷酸盐（含氟磷块岩））。已有研究表明，永红式热液充填型萤石矿可能与峨边-金阳大断裂密切相关^[8]，那么永红式热液充填型萤石矿的发现，对峨边-金阳断裂带区域找矿具有重要的指导意义。

近年，在实施马边地区永红磷矿勘探项目过程中，新发现了萤石矿，该萤石矿床位于马边彝族自治县县城 210° 方向，平距约 35 km 处，隶属马边彝族自治县永红乡管辖。其萤石资源量达 45.0 万 t（其中控制资源量 25.6 万 t，推断资源量 19.4 万 t）^①，达中型矿床规模，从此建立了马边地区磷-萤石矿找矿新模型，促进了马边地区从以往的单一矿种（磷矿）勘查开发历史转型升级为目前的多矿种多空间（磷-萤石矿）勘查开发现状^[8]。四川恰好属于缺乏萤石矿和无萤石成矿区的地区^[9]，四川仅有 2 座小型萤石矿床，且尚未开采，可见四川萤石矿床极度缺乏。鉴于萤石在战略性新兴产业中的重要应用和未来快速增长的需求形势，本次在马边地区永红乡首次发现中型萤石矿床，无疑对填补无萤石成矿区的空白、指导峨边-金阳大断裂带的区域找矿和推动乌蒙山区经济发展都具有重要意义。

1 区域地质背景

马边地区位于扬子陆块西缘（图 1a）。已有研究表明，扬子陆块由前震旦纪结晶/褶皱基底和震旦纪以来的沉积盖层组成，其地史演化大致有基底形成（前震旦纪）、盖层发展（震旦纪—中三叠世）、陆相盆地演化（晚三叠世—白垩纪）和喜马拉雅期褶皱造山（古近纪—第四纪）四个演化阶段^[10]，马边地区的萤石矿床产出于盖层发展阶段早期的寒武系组芬兰统地层中。而马边地区萤石成矿与区域构造演化密切相关。南华纪中晚期-早中三叠世，陆块基本稳定，广泛接受陆表海浅海碳酸盐岩、碎屑岩沉积；至中三叠世末，受西部印支运动影响，盆地抬升，结束海相沉积历史；新生代以来，受来自西侧印度板块俯冲产生的南东向构造脱逸，产生南北向断裂、褶皱，发育压性断裂，主要产出紧密线状褶皱，主体构造线近南北向^[11]，与研究区萤石成矿密切相关的峨边-金阳断裂带即形成于该时期（图 1b）。

区内地层出露震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、二叠系、三叠系、侏罗系和第四系等地层，除志留系温洛克统、罗德洛统、普里道利统

和泥盆系、石炭系及白垩系以后的地层因构造剥蚀而缺失外，其余地层均有较好地出露（图 1d）。萤石含矿地层为寒武系组芬兰统筇竹寺组，为马边地区的主要萤石赋矿层位，筇竹寺组与下伏的区域磷矿勘探层位麦地坪组呈平行不整合接触^[12]，寒武系组芬兰统麦地坪组与下伏的震旦系灯影组呈整合接触（图 1c）。

2 研究方法

通过本次野外地质调查和收集、分析《四川省马边县麦子坪矿区北矿段磷矿勘探报告》资料，以往的勘探工作主要采用了 1:5000 万地质填图、钻探工程、探槽工程、坑道等手段对萤石矿体进行调查和控制，采集标本、薄片、选矿实验等样品，分析测试 CaF_2 品位，开展萤石矿选冶实验。本文结合区域地质背景、矿床地质特征、矿体特征和矿石特征及选冶实验成果，进行综合分析，对马边地区永红萤石矿床进行了矿床成因、矿石开发利用价值及对峨边-金阳大断裂带的区域找矿启示的探讨。

3 研究结果

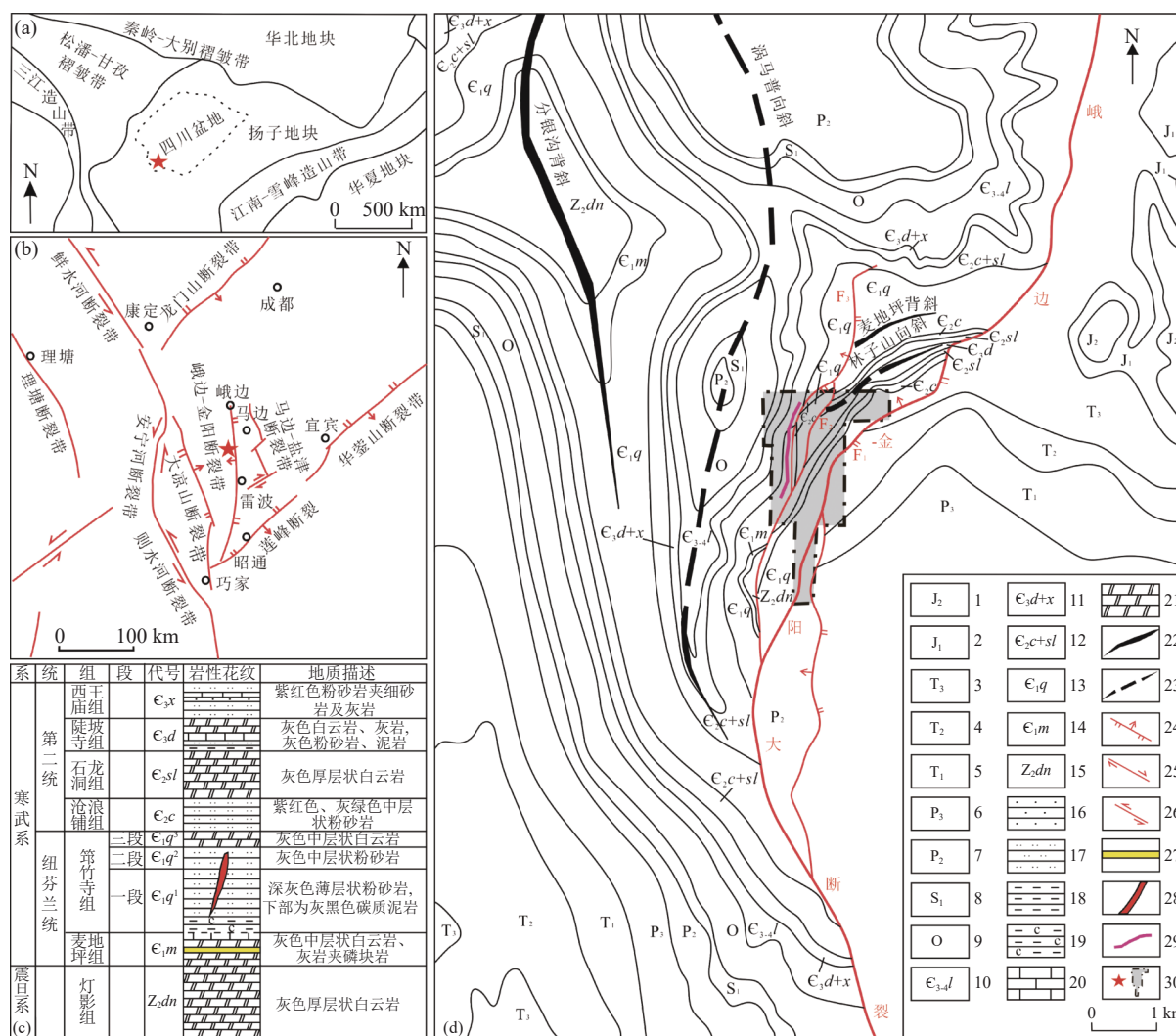
3.1 矿床地质特征

矿区无岩浆岩出露，仅外围有峨眉山玄武岩出露，现将矿区地层、构造叙述如下。

3.1.1 矿区地层

马边永红矿区及外围主要出露震旦系上统灯影组（ Z_2dn ）、寒武系麦地坪组（ ϵ_1m ）、筇竹寺组（ ϵ_1q ）、沧浪铺组（ ϵ_2c ）、石龙洞组（ ϵ_2sl ）、陡坡寺组（ ϵ_3d ）、西王庙组（ ϵ_3x ）、娄山关组（ $\epsilon_{3-4}l$ ）、红石崖组（ O_1h ）、巧家组（ $O_{1-2}q$ ）、宝塔组（ $O_{2-3}b$ ）、五峰组（ O_3w ）、龙马溪组（ S_1l ）、梁山组（ P_2l ）、栖霞组（ P_2q ）和茅口组（ P_2m ）等地层^①。与萤石成矿有关的地层有灯影组（ Z_2dn ）、麦地坪组（ ϵ_1m ）和筇竹寺组（ ϵ_1q ）。灯影组（ Z_2dn ）主要由浅灰色、灰色中-厚层状白云岩组成，间夹断续燧石条带。麦地坪组（ ϵ_1m ）为区域上重要的磷矿层位，岩性为灰色薄层状至中层状粉晶白云岩、含磷砂屑、砾屑白云岩、磷块岩，局部夹有少量黏土岩。

筇竹寺组（ ϵ_1q ）为矿区萤石赋矿层位，分为 3 个岩性段，筇竹寺组一段（ ϵ_{1q}^1 ）以灰绿色、灰黑色薄-中层状炭质粉砂岩，灰黑色泥质粉砂岩夹



1. 中侏罗统; 2. 下侏罗统; 3. 上三叠统; 4. 中三叠统; 5. 下三叠统; 6. 上二叠统; 7. 中二叠统; 8. 志留系; 9. 奥陶系; 10. 寒武系第三统-芙蓉统关山组; 11. 寒武系第三统陡坡寺组和西王庙组; 12. 寒武系第二统沧浪铺组和石龙洞组; 13. 寒武系组芬兰统筇竹寺组; 14. 寒武系组芬兰统麦地坪组; 15. 震旦系上统灯影组; 16. 细砂岩; 17. 粉砂岩; 18. 泥岩; 19. 碳质泥岩; 20. 灰岩; 21. 白云岩; 22. 背斜轴迹; 23. 向斜轴迹; 24. 逆冲断层; 25. 右行走滑断层; 26. 左行走滑断层; 27. 磷矿层; 28. 萤石矿体; 29. 萤石矿体; 30. 研究区

1. Middle Jurassic; 2. Lower Jurassic; 3. Upper Triassic; 4. Middle Triassic; 5. Lower Triassic; 6. Upper Permian; 7. Middle Permian; 8. Silurian Llandovery; 9. Ordovician; 10. Cambrian Series III-Furongian Loushanguan Formation; 11. Cambrian Series III Douposi Formation and Xiwangmiao Formation; 12. Cambrian Series II Canglangpu Formation and Shilongdong Formation; 13. Cambrian Terreneuvian Qiongzhusi Formation; 14. Cambrian Terreneuvian Maidiping Formation; 15. Sinian System Dengying Formation; 16. Fine Sandstone; 17. Siltstone; 18. Mudstone; 19. Carbonaceous Mudstone; 20. Limestone; 21. Dolomite; 22. anticline axis trace; 23. synclinal axis trace; 24. thrust Fault; 25. right-lateral strike-slip Fault; 26. left strike-slip Fault; 27. Phosphate rock layer; 28. Fluorite ore bodies; 29. Fluorite ore bodies; 30. Study area.

图1 马边地区永红萤石矿区大地构造位置^[13]及区域构造^[11]、岩性柱状图及地质简图

Fig.1 Geotectonic position^[13], regional structure^[11], lithology histogram and geological diagram of Yonghong fluorite mining area in Mabian area

灰色薄-中层状长石石英砂岩为主，底部为灰黑色薄层状碳质水云母黏土岩、泥岩，岩层中见褐铁矿化现象，含黄铁矿颗粒；筇竹寺组二段（ ϵ_{1q^2} ）为灰色薄-中层状长石石英砂岩夹浅灰色-灰白色粉砂岩、灰色薄层状泥质粉砂岩、深灰色泥页岩；筇竹寺组三段（ ϵ_{1q^3} ）以灰色、灰绿色中-厚层状

泥质白云岩、粉晶白云岩为主，局部夹灰白色薄-中层状石英砂岩及灰色薄层状灰岩。

3.1.2 矿区构造

(1) 背斜

马边永红矿区位于涡马普向斜南段东缘，区域大断裂峨边-金阳大断裂（ F_1 ）以西（图1d）。

受区域构造影响, 矿区构造行迹以南北向为主, 亦派生北东东向构造。峨边-金阳大断裂 (F_1) 以西, 自西向东, 依次是麦地坪背斜和林子山向斜, 林子山向斜东翼与峨边-金阳大断裂 (F_1) 接触。麦地坪背斜核部地层为灯影组, 北西翼为麦地坪组、筇竹寺组、沧浪铺组、石龙洞组等地层, 倾向西、北西, 倾角 $23^{\circ} \sim 60^{\circ}$; 南东翼地层为筇竹寺组、沧浪铺组, 倾向东、南东, 倾角 $7^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。林子山向斜核部地层为沧浪铺组, 两翼出露均为沧浪铺组、筇竹寺组, 北西翼地层产状为 $31^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 南东翼地层产状为 $6^{\circ} \sim 50^{\circ}$, 东翼沧浪铺组与峨边-金阳大断裂 (F_1) 接触。

(2) 断层

矿区内从东到西依次分布峨边-金阳大断裂 (F_1)、断裂 (F_2)、断裂 (F_3) 及断裂 (F_4) 等 4 条断裂 (图 1d), 其中峨边-金阳大断裂 (F_1) 为主断裂, 其中 F_2 、 F_3 断裂为峨边-金阳大断裂 (F_1) 平行发育的次级断裂。

峨边-金阳大断裂 (F_1): 为区域性大断裂, 从南到北途经金阳、雷波、马边、峨边, 长约 220 km, 走向近南北向, 断裂带一般宽约 0.9~3.5 km, 由 2~6 条近于平行的逆冲断层组成, 区域性的断面产状 $250^{\circ} \sim 314^{\circ} \angle 45^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。该断裂纵贯矿区东南部, 为萤石矿体的导矿构造, 走向近南北向, 断面产状倾向 $270^{\circ} \sim 280^{\circ} \angle 65^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 地貌上形成南北向的负地形。上盘为震旦系灯影组、寒武系麦地坪组、筇竹寺组、沧浪铺组等相对较老的地层, 下盘为上二叠统峨眉山玄武岩、宣威组、下三叠统飞仙关组、嘉陵江组等相对较新的地层, 断距达千米, 该断裂为逆冲断层。

断裂 (F_2): 该断裂位于矿区中部, 延伸长约 2.3 km, 走向近南北向, 向南北延伸均与断裂 (F_3) 相汇。经钻孔控制, 其破碎带宽 11.8~28.7 m, 其上盘地层为寒武系下统筇竹寺组, 下盘地层为寒武系下统沧浪铺组, 断层产状 $280^{\circ} \sim 305^{\circ} \angle 60^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 断距约 200~350 m。该断裂属于峨边-金阳大断裂 (F_1) 的次级断层, 为一压扭性断裂构造, 性质为逆冲断层, 对萤石矿的作用较小。

断裂 (F_3): 该断裂位于矿区西北部, 延伸长约 7.5 km, 北端延伸出矿区, 消失于寒武系地层中, 向南延伸与峨边-金阳大断裂 (F_1) 相汇。断裂走向近南北向, 断层产状 $250^{\circ} \sim 280^{\circ} \angle 55^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。上盘地层为震旦系灯影组、寒武系麦地坪组、筇竹寺组、沧浪铺组及以上地层, 下盘地层为寒武

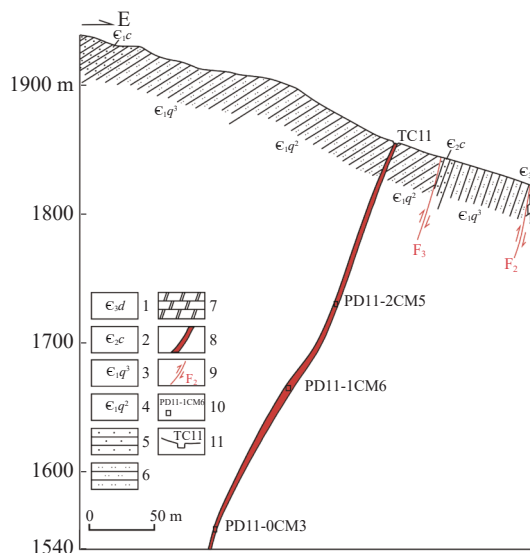
系筇竹寺组、沧浪铺组, 性质为逆冲断层。该断裂破碎带宽 37.0~47.5 m, 断距 150~650 m。该断裂 (F_3) 为矿区萤石成矿的导矿构造。

断裂 (F_4): 该断层被萤石矿脉充填, 属于导矿构造断裂 (F_3) 的次级断裂, 形成于筇竹寺组一段和二段地层内部, 为储矿构造。该断层平行于断裂 (F_3) 分布, 走向近南北向, 断层产状 $255^{\circ} \sim 290^{\circ} \angle 65^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。

3.2 矿体和矿化特征

3.2.1 矿体和矿化特征

矿区内发现萤石矿体一个, 走向呈近南北向偏东, 倾向西, 倾角 $65^{\circ} \sim 85^{\circ}$, 与围岩筇竹寺组 (ϵ_{1q}) 地层产状斜交 (图 2; 图 3b)。萤石矿体呈脉状产出, 产于寒武系筇竹寺组 (ϵ_{1q}) 泥质粉砂岩、粉砂岩的断层 (F_4) 中, 严格受断裂控制 (图 3a)。矿体充填于与主要断裂 (F_1 、 F_2 、 F_3) 的断裂面近平行的次级断层 (F_4) 中, 矿体呈比较规则的脉状, 与围岩的接触面具有明显的界线 (图 3a)。经 17 个探槽、9 个坑内钻探及 53 个坑探采样点共计 79 个工程点控制, 萤石矿体走向长 1460 m, 宽度 155~580 m, 矿体分布标高 1470~1825 m, 矿体延展规模为中型。矿体厚度 0.41~4.64 m, 平均 1.72 m, 厚度变化系数为 53.48%, 矿体连续性好, 属较稳定型矿床。矿体



1. 寒武系第三统陡坡寺组; 2. 寒武系第二统沧浪铺组; 3. 寒武系芬兰统筇竹寺组第三段; 4. 寒武系芬兰统筇竹寺组第二段; 5. 细砂岩; 6. 粉砂岩; 7. 白云岩; 8. 萤石矿体; 9. 逆断层及编号; 10. 坑沿脉采样点及编号; 11. 探槽采样点及编号

图 2 马边地区永红萤石矿床 2 号勘探线剖面

Fig.2 Profile of exploration line No.2 of Yonghong fluorite deposit in Mabian area



图3 马边地区永红萤石矿石结构构造及显微镜下特征

Fig.3 Structure and microscopic characteristics of Yonghong fluorite ore in Mabian area

顶板围岩为筇竹寺组(C_1q)灰、深灰色薄至中层状泥质粉砂岩(图3c)。

据勘探资料显示^①, 矿石化学组分主要为 CaF_2 及伴生的Pb、Zn、Ag, 其中 CaF_2 品位0.62%~70.39%, 平均34.61%, Pb含量0.33%~5.70%, 平均2.00%, Zn含量0.04%~3.64%, 平均1.94%, Ag含量6.20%~287.61 $\mu g/g$, 平均67.03 $\mu g/g$, As含量0.001%~0.01%, Hg含量<0.02%, Se含量<0.02%, Bi含量<0.02%, Sb含量0.01%~0.03%, Ts含量0.58%~6.93%, 平均3.18%, WO_3 含量<0.02%, Sn含量<0.02%, Cu含量0.02%~0.04%, Sn含量0.01%, Ga含量<0.02%, Ge含量<0.02%, Cd含量<0.01%, In含量<0.02%, Tl含量<0.02%, U含量<0.02%。综上所述, 除Pb、Zn、Ag达到伴生有用组份评价指标外, 其余未达到伴生有用组份评价指标, As、Hg等有害元素含量低, 不影响矿石利用。

CaF_2 品位变化较大。据72个工程分析结果,

CaF_2 品位最低为0.62%, 最高为70.39%, 平均品位34.56%, 品位变化系数为60.95%, CaF_2 品位较不均匀, 达不到最低工业品位的工程有26个, 占工程总数的36%。据167个样品分析结果, CaF_2 品位最低0.40%, 最高88.69%, 平均品位35.13%, 品位变化系数为72.42%, CaF_2 品位不均匀, 达不到边界品位的样品有57件, 占样品总数的34%。

3.2.2 矿石结构构造、矿物组成及矿石类型

矿石结构以粗晶半自形-它形粒状结构为主, 其次是微晶它形粒状结构和碎裂状结构。矿石构造主要有块状构造(图3d)、细脉状-网脉状构造(图3e)、角砾状构造(图3f)、条带状构造(图3g), 其中具角砾状构造的萤石矿石见较多的围岩筇竹寺组粉砂岩角砾(图3f)。

根据矿石薄片和光片鉴定结果表明, 矿石矿物主要为萤石(含量约20%~90%), 脉石矿物以石英(含量约5%~30%)、方解石(含量约5%)为主, 其次是方铅矿、闪锌矿、红锌矿、白铅

矿、白云母、黏土矿物、有机质, 含有微量的黄铁矿 (图 3k、l)。各矿物特征如下:

萤石: 多呈白色 (图 3h)、浅绿色 (图 3i), 少量为紫色 (图 3j), 透明。粒度 2~11 cm, 形成中粗粒集合体, 构成块状萤石矿石;

石英: 石英多为乳白色、灰白色, 少为灰黑色, 油质光泽。粒度 <1 mm, 分布不均, 大多沿裂隙分布;

方解石: 灰白色, 半透明状, 呈它形微晶及集合体, 多以团块状、脉状产出;

闪锌矿: 多呈棕褐色、黄褐色, 具松脂光泽至金刚光泽, 中至细粒半自形-它形晶集合体, 含量 1%~3%, 粒度大小不一, 多为 <2 mm 集合体呈团块、条纹条带、星点不均分布于矿石中; 常与黄铁矿、方铅矿伴生, 黄铁矿常被包裹于闪锌矿中; 方铅矿常呈星点状、细脉状充填于闪锌矿中;

方铅矿: 呈铅灰色、灰色, 金属光泽, 中至细粒半自形-它形晶集合体, 含量 2%~3%, 粒径一般 <4.5 mm, 0.5~2 mm 者居多; 呈团块、条纹条带、星点不均分布于少量萤石矿石中;

红锌矿: 呈暗红、浅黄色、浅褐色, 微至细粒它形、半自形片状, 柱粒状、粒状集合体分布于闪锌矿边缘及附近。

白铅矿: 呈白色葡萄状及土状分布于方铅矿边缘裂隙中, 往往被染成浅褐色。

白云母: 呈鳞片状及集合体, 量少, 零星可见; 黏土矿物: 多为隐晶集合体, 多呈细分散状, 细小团状, 丝状, 分布不均;

有机质: 分布不均匀, 多呈尘点状 (主)、线纹状 (少) 等混杂于标本的深灰色 (微) 条带中并渲染之。

根据野外调查和薄片鉴定, 研究区的萤石矿石类型主要有萤石型矿石 (图 3d、h、i) 和硫化物-萤石型矿石 (图 3e、j、l), 少量为石英-萤石型矿石 (图 3g) 和方解石-萤石型矿石 (图 3f)。萤石型矿石主要由萤石组成, 含少量其他杂质; 硫化物-萤石型矿石: 除萤石外, 含有一定量的铅锌硫化物, 并可达到利用要求; 石英-萤石型矿石: 含有少量石英, 萤石含量大于石英; 方解石-萤石型矿石: 含有少量方解石, 萤石含量大于方解石。

3.2.3 围岩蚀变

萤石矿体的围岩蚀变主要有萤石化、硅化、重晶石化、白云石化, 受断裂控制, 呈带状分布。现分述如下:

萤石化: 萤石呈紫色、紫红、白色或无色透明, 玻璃光泽, 呈自形、半自形粒及他形晶集合体, 呈块状及条带分布, 或与重晶石、石英、方解石不均组成团块及条带产出。

硅化: 黑色硅质呈隐晶质条带条纹状沿萤石脉壁两侧分布, 渐远渐稀, 直至消失。其内部或附近常见闪锌矿、方铅矿、白铅矿。硅化与铅锌矿化关系密切。

重晶石化: 重晶石呈自形半自形或他形晶粗粒集合体。自形晶呈板状, 局部形成透镜状集合体, 半自形晶和他形晶呈粗粒团块集合体。

白云石化: 白云石呈他形至半自形粒状, 晶粒介于 0.01~2 mm, 一般为 0.05~0.25 mm, 以细脉形式沿围岩中的裂隙产出, 产于矿体的外围, 是成矿作用晚期的产物。

4 讨 论

4.1 矿石开发利用潜力评价

4.1.1 矿石有害组分对矿石利用的影响

对萤石精矿进行多元素分析测试显示, BaSO₄ 含量 0.97%, CaCO₃ 含量 1.01%, Al₂O₃ 含量 0.06%, Fe₂O₃ 含量 0.03%, SiO₂ 含量 0.75%, SrSO₄ 含量 0.05% (表 1)。对矿石放射性元素 ²²⁶Ra、²³²Th 及 ⁴⁰K 进行了分析, 结果为 ²²⁶Ra 平均 218 Bq/kg; ²³²Th 平均 8.495 Bq/kg, ⁴⁰K 平均 189.93 Bq/kg, 均低于标准规定的限量要求。可见萤石精矿中的有害元素及放射性元素含量低于限值, 矿石质量较好, 可供冶金、化工、陶瓷、玻璃等行业使用, 加上原矿品位较高, 矿床规模达中型, 因此具有较大的开发利用价值。

表 1 马边地区永红矿区萤石精矿多元素分析结果/%
Table 1 Multi element analysis results of fluorite concentrate in Yonghong ore district of Mabian area

CaF ₂	BaSO ₄	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	SrSO ₄
97.05	0.97	1.01	0.06	0.03	0.75	0.05

4.1.2 矿床共 (伴) 生矿产综合评价

矿体中矿石矿物主要为萤石, 其次是方铅矿、闪锌矿、红锌矿、白铅矿, 萤石矿石化学组分主要为 CaF₂ 和共生的 Pb、Zn 及伴生的 Ag, 其中 CaF₂ 品位 0.62%~70.39%, 平均 34.61%, Pb 含量 0.33%~5.70%, 平均 2.00%, Zn 含量 0.04%~3.64%, 平均 1.94%, Ag 含量 6.20~287.61 μg/g, 平均 67.03 μg/g, 除萤石具有利用价值外, 共伴生的 Pb、Zn、Ag 已达综合利用指标。

4.1.3 矿石工业利用性能评价

我国虽然是萤石储量大国，但我国的萤石资源开发利用率不高，常造成资源浪费^[14]，为了提高萤石资源的利用率，进行了萤石矿的回收实验。浮选是获取萤石精矿较为有效的选矿方法^[15]，因此根据矿石性质，采用浮选工艺进行分选^①。

首先，进行磨矿细度、碳酸钠用量、水玻璃用量、油酸用量的条件实验，在不同磨矿细度、碳酸钠用量、水玻璃用量和油酸用量下进行萤石矿石浮选实验，查明对萤石浮选的影响，确定较佳工艺条件。实验结果表明，随着萤石粗选水玻璃用量的增加， CaF_2 品位逐渐上升， CaF_2 回收率逐渐下降，而油酸用量对萤石浮选结果影响不明显。综合考虑，萤石粗选水玻璃用量以 1000 g/t 相对较好。随后，进行了开路实验、闭路实验和选矿产品检查。原矿在磨矿细度-0.074 mm 80.1% 的条件下经一次粗选、七次精选得到萤石精矿。

选矿实验结果表明，浮选可获得产率为 26.17%，品位为 91.35%，回收率 61.34% 的萤石精矿，萤石矿石可选性较好，属于易选矿石。

4.2 矿床成因初探

永红萤石矿床产于寒武系组芬兰统筇竹寺组粉砂岩中，构造控矿明显，萤石矿体呈比较规则的脉状，与围岩的接触面具有明显的界线，矿体产状与主要断裂（ F_1 、 F_2 、 F_3 ）的产状基本一致，表明断层是含矿热液运移的通道和储矿空间，该矿体在成因上属于后期构造热液充填的结果，特别是与区域性峨边-金阳大断裂（ F_1 ）密切相关。由于该类型萤石矿床与川滇黔地区碳酸盐岩容矿铅锌矿的产出地质背景、矿体形态及产状都极为相似，且常常在空间上共伴生在一起，因此在成矿时代、矿床成因可借鉴邻近区域产于碳酸盐岩建造中受断裂控制的脉状铅锌矿床的研究成果。已有研究表明，雷波-金阳一带的 MVT 铅锌成矿年龄在 196~200 Ma，相对应于早侏罗世，形成于前陆晚期冲断挤压环境^[16]。王健等^[17]通过对四川天宝山铅锌矿床开展成矿年代、成矿物质来源及成矿构造环境研究，认识到川滇黔地区存在两期铅锌成矿作用，分别形成于晚泥盆世-早石炭世与古特提斯洋张开有关的伸展构造环境和晚三叠世-早侏罗世与古特提斯洋闭合有关的收缩构造环境，川滇黔地区铅锌矿床获得的成矿年龄主要分布在 228~191.9 Ma，少部分集中在 366.3~

321.7 Ma，其中 228~191.9 Ma 与秦建华等^[16]确定的成矿时代 196~200 Ma 基本吻合。另外，与萤石成矿有关的峨边-金阳大断裂卷入了震旦系至侏罗系地层，并整体发生褶皱变形，未发现角度不整合界面，认为峨边-金阳大断裂最晚活动时期下限为燕山期^[11]，这与秦建华等^[16]研究的雷波-金阳一带的 MVT 铅锌成矿年龄和王健等^[17]认为的晚三叠世-早侏罗世成矿期基本吻合，那么可以推测研究区萤石成矿时代可能为晚三叠世-早侏罗世。

已有研究表明，热液充填型萤石矿床主要分布于新生代岩浆活动频繁的地区^[18]。中国萤石矿床的成矿要素有白云岩、灰岩、火山岩（包括火山碎屑岩）、侵入岩（花岗岩、次火山岩等）和断裂等，其中灰岩、火山岩和侵入岩为矿床形成的物源条件，断裂是各种矿床类型共有的必要成矿要素^[7]。矿区周围除了有峨眉山玄武岩分布外，矿区外围及深部目前未见其他岩浆岩分布，峨眉山玄武岩又被峨边-金阳大断裂（ F_1 ）切割，故推测该萤石矿床的成矿流体可能与岩浆热液无关，但还需进一步研究证实。王吉平等（2014）^[7]研究显示，中国萤石矿床的物源除了火山岩和侵入岩外，还与白云岩、灰岩密切相关。根据矿区地质特征，赋矿地层下伏地层为寒武系麦地坪组（ C_1m ）和震旦系上统灯影组（ Z_2dn ），Ca 很可能主要来源于沉积的海相碳酸盐岩，即震旦系上统灯影组（ Z_2dn ）白云岩和寒武系麦地坪组（ C_1m ）含磷白云岩、含磷灰岩及磷块岩。王吉平等（2014）^[7]研究中国萤石矿床的成矿规律后，认为热液充填型萤石矿床的形成与高含 F 的源岩有关，矿床周围必然有高含 F 的岩石。已有研究表明，川滇黔地区铅锌矿床的成矿金属元素主要来源于基底地层^[19]，那么可以推测萤石矿的 F 的来源有可能来源于筇竹寺组下伏的麦地坪组中富含 F 的磷块岩。据四川省地矿局二零七地质队的磷矿勘探资料，寒武系麦地坪组（ C_1m ）磷块岩中的磷矿物为超微晶至细微晶的氟磷灰石 $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}]$ ，该矿物中含氟 3%~4%^[20]，说明氟磷灰石中富含 F。据勘探资料，永红矿区的磷矿石中 F 含量 1.13%~2.90%，平均 1.93%，证实磷块岩中富含 F，说明萤石矿中 F 的来源有可能来源于含氟的磷块岩。

已有资料表明，由于 MgF_2 的溶解度远大于 CaF_2 ，在 F 的迁移形式中， MgF^+ 络合物是所有含 F 络合物中最稳定的形式之一，富 Mg 的岩石有利

于的 F 的迁移,在赋矿层中的富 Ca 岩石为 F 的富集和萤石成矿提供了有利条件^[21]。正好赋矿地层的下伏地层为寒武系麦地坪组 (C_{1m}) 含磷白云岩、含磷灰岩及含氟磷块岩和震旦系上统灯影组 (Z_2dn) 白云岩,白云岩中富含 Mg,磷块岩中富含 F。构造运动为地下热水活化、萃取 Mg、F 成为含矿热液提供了热源,同时也会萃取白云岩和灰岩中的部分 Ca,使含矿热液中含有 Mg、F 和 Ca,但 Mg 的含量远远高于 Ca,使得 F 以 MgF^+ 络合物的形式迁移。加之筇竹寺组底部的灰黑色碳质页岩岩性致密的岩石作为下伏地层,筇竹寺组的上覆地层沧浪铺组泥岩、灰岩及白云岩等岩性致密的岩石作为盖层,筇竹寺组粉砂岩属于孔隙度较大、裂隙发育的含水层,上覆地层的富含 Ca 的岩溶水下渗到筇竹寺组粉砂岩中储集。受断裂构造作用,含 F 热液沿主断裂通道运移至筇竹寺组中上部的富 Ca 粉砂岩中,含矿热液进一步活化、萃取少量围岩中的 Ca,同时因断裂产生的压力差,使富 Ca 地下水向断裂通道运移,使 Ca 达到过饱和,最终以 CaF_2 的形式沉淀成矿。

综上所述,马边地区永红萤石矿床属于中低温热液充填型矿床,成矿要素有白云岩、灰岩、含氟磷块岩和断裂,无火山岩和侵入岩,属于王吉平等(2014)未系统归纳的另一种热液充填型矿床式,即永红式热液充填型萤石矿(断裂+碳酸盐岩(灰岩、白云岩)+磷酸盐(含氟磷块岩))。

4.3 对峨边-金阳大断裂带的萤石找矿启示

峨边-金阳大断裂位于四川盆地南部,从金阳向北经马边、桷水坝止于峨边,长约 220 km^[22]。峨边-金阳大断裂走向近南北,主要断于古生界至中生界中,在该大断裂上的马边、雷波、金阳地区磷矿资源丰富,同样有灯影组白云岩分布。基于上述总结的永红式热液充填型萤石矿床,成矿要素有断裂、碳酸盐(灰岩、白云岩)、磷酸盐(含氟磷块岩),因此推测在峨边-金阳大断裂带上的马边、雷波、金阳地区有较好的萤石找矿前景。

四川是缺乏萤石矿和无萤石成矿区带的地区^[9],峨边-金阳大断裂带上的马边、雷波、金阳地区有较好的萤石找矿前景,本次在马边地区永红乡首次发现中型萤石矿床,并总结出前人未系统归纳的另一种热液充填型矿床式,对填补四川无萤石成矿带的空白和指导峨边-金阳大断裂带的区域找

矿及推动乌蒙山区经济发展都具有重要意义。

5 结 论

(1) 马边地区永红萤石矿查明资源量 45.0 万 t, CaF_2 平均品位 34.61%,为中型萤石矿床;经一次粗选、七次精选,可获得产率为 26.17%,品位为 91.35%,回收率 61.34%的萤石矿,萤石矿石可选性较好,属于易选矿石。马边地区永红萤石矿床出于寒武系组芬兰统筇竹寺组粉砂岩中,严格受断层控制,矿体产状与主断裂的产状基本一致;属于中低温热液充填型矿床,成矿要素有白云岩、灰岩、含氟磷块岩和断裂,无火山岩和侵入岩,属于前人未总结的热液充填型萤石矿床另一种矿床式,即永红式热液充填型萤石矿(断裂+碳酸盐岩(灰岩、白云岩)+磷酸盐(含氟磷块岩))。

(2) 在马边地区永红乡首次发现中型萤石矿床,峨边-金阳大断裂带上的马边、雷波、金阳地区具有较好的萤石找矿前景,对填补四川无萤石成矿带的空白和指导峨边-金阳大断裂带的区域找矿及推动乌蒙山区经济发展都具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈军元,刘艳飞,颜玲亚,等. 石墨、萤石等战略非金属矿产发展趋势研究[J]. 地球学报, 2021, 42(2):287-296.
- [2] CHEN J Y, LIU Y F, YAN L Y, et al. Research on development trend of strategic nonmetallic minerals such as graphite and fluorite[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2021, 42(2):287-296.
- [3] 李敬,高永璋,张浩. 中国萤石资源现状及可持续发展对策[J]. 中国矿业, 2017, 26(10):7-14.
- [4] LI J, GAO Y Z, ZHANG H. Fluorite resource status and its sustainable development countermeasures in China[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(10):7-14.
- [5] 曾小波,印万忠. 共伴生型萤石矿浮选研究进展与展望[J]. 矿产综合利用, 2021(1):1-7.
- [6] ZENG X B, YIN W Z. Reserch progress and prospect of flotation of assou ciated fluorite minerals[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1):1-7.
- [7] [4] 刘忠义,马子龙,刘杰,等. 含云母方解石型萤石矿的浮选柱分选实验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(2):60-64.
- [8] LIU Z Y, MA Z L, LIU J, et al. Experimental research on flotation column separation of micaceous calcite-type fluorite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(2):60-64.
- [9] [5] 崔瑞,王旭,魏骞,等. 湖北某重晶石-萤石型矿综合利用研究[J]. 矿产综合利用, 2019(2):70-74.

- CUI R, WANG X, WEI Q, et al. Study on comprehensive utilization of a barite-fluorite ore in Hubei Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(2):70-74.
- [6] HAN B B, SHANG P Q, GAO Y Z, et al. Fluorite deposits in China: geological features, metallogenic regularity, and research progress[J]. *China Geology*, 2020(3):473-489.
- [7] 王吉平, 商朋强, 熊先孝, 等. 中国萤石矿床分类[J]. *中国地质*, 2014, 41(2):315-325.
- WANG J P, SHANG P Q, XIONG X X, et al. The classification of Fluorite deposits in China[J]. *Geology in China*, 2014, 41(2):315-325.
- [8] 文俊, 张航飞, 竹合林, 等. 四川马边地区找矿新发现: 磷-铅-萤石矿三位一体找矿新模型[J]. *地质论评*, 2021, 67(6):1802-1803.
- WEN J, ZHANG H F, ZHU H L, et al. New discovery of prospecting in Mabian area, Sichuan: a new trinity prospecting model of phosphorus-lead-fluorite deposit[J]. *Geological Review*, 2021, 67(6):1802-1803.
- [9] 王吉平, 商朋强, 牛桂芝. 中国萤石矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. *化工矿产地质*, 2010, 32(2):87-94.
- WANG J P, SHANG P Q, NIU G Z. Discussion on China fluorite-concentrating area and the resource potentialhina[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2010, 32(2):87-94.
- [10] 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1993, 1-188.
- LIU B J, XU X S, PAN X N, et al. Sedimentary crustal evolution and mineralization of ancient continents in Southern China [M]. Beijing: Science Press, 1993, 1-188.
- [11] 张芹贵, 彭向辉, 祝建华. 马边-雷波峨边-金阳大断裂构造特征及活动性[J]. *四川地质学报*, 2019, 39(1):30-33.
- ZHANG Q G, PENG X H, ZHU J H. Characteristics and activity of the Mabian-Leibo-Ebian-Jinyang major Fault[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2019, 39(1):30-33.
- [12] 刘建清, 何利, 江永富, 等. 四川雷波地区下寒武统麦地坪含磷地层研究及磷矿资源潜力分析[J]. *中国地质*, 2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200804.0937.004.html>.
- LIU J Q, HE L, JIANG Y F, et al. Phosphorus bearing strata in Maidiping formation of lower Cambrian in Leibo area of Sichuan Province and its potential analysis of phosphate resources[J]. *Geology in China*, 2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200804.0937.004.html>.
- [13] 文俊, 刘治成, 赵俊兴, 等. 川南沐川地区宣威组底部铌-稀土多金属富集层富集规律、沉积环境与成矿模式[J]. *地质学报*, 2021.
- WEN J, LIU Z C, ZHAO J X, et al. Enrichment regularity, sedimentary environment and metallogenic model of niobium-rare earth polymetallic enrichment layer in bottom of Xuanwei Formation in Muchuan Area, South Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021.
- [14] 马隆飞, 廖寅飞, 贺玉程, 等. 赣州某萤石尾矿浮选柱分选实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(2):89-93.
- MA L F, LIAO Y F, HE Y C, et al. Experimental study on flotation column separation of a fluorite tailings in Ganzhou[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(2):89-93.
- [15] 宁江峰, 李茂林, 崔瑞, 等. $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 与水玻璃组合抑制剂对萤石、方解石浮选分离的影响[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):186-192.
- NING J F, LI M L, CUI R, et al. Effect of $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and sodium silicate as combination inhibitors on flotation separation of fluorite and calcite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):186-192.
- [16] 秦建华, 廖震文, 朱斯豹, 等. 川滇黔相邻区碳酸盐岩容矿铅锌矿成矿特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2016, 36(1):1-13.
- QIN J H, LIAO Z W, ZHU S B, et al. Mineralization of the carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou area, southwestern China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2016, 36(1):1-13.
- [17] 王健, 张均, 张晓军, 等. 四川天宝山矿床闪锌矿 Rb-Sr 年代学、稳定同位素及地质意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(9):3026-3041.
- WANG J, ZHANG J, ZHANG X J, et al. Rb-Sr geochronology, stable isotopic analyses and geological significance of the Tianbaoshan Pb-Zn deposit in Sichuan Province, China[J]. *Earth Science*, 2019, 44(9):3026-3041.
- [18] 王吉平, 商朋强, 熊先孝, 等. 中国萤石矿床成矿规律[J]. *中国地质*, 2015, 42(1):18-32.
- WANG J P, SHANG P Q, XIONG X X, et al. Metallogenic regularities of fluorite deposits in China[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1):18-32.
- [19] 韦晨, 叶霖, 李珍立, 等. 四川乌斯河铅锌矿床成矿物质来源及矿床成因: 来自原位 S-Pb 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2020, 36(12): 3783-3796.
- WEI C, YE L, LI Z L, et al. Metal sources and ore genesis of the Wusihe Pb-Zn deposit in Sichuan, China: new evidence from in-situ S and Pb isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(12): 3783-3796.
- [20] 蔡祖成. 磷矿伴生氟资源综合利用探讨[J]. *广州化工*, 2016, 44(13):26-28.
- CAI Z C. Discussion on the comprehensive utilization of phosphate associated fluorine resource[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2016, 44(13):26-28.
- [21] 曹俊臣. 中国萤石矿床分类及其成矿规律[J]. *地质与勘探*, 1987(3):12-17.
- CAO J C. The classification and metallogenic regularity of fluorite deposits in China[J]. *Geology and Prospecting*, 1987(3):12-17.
- [22] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1982, 1-621.
- Sichuan provincial bureau of geology and mineral resources. Sichuan provincial regional geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982, 1-621.

Geological Features of Kvanefield REE Deposit in Southwestern Greenland

Chao Wenwen¹, Zhou Jiayun², Jiang Xiaoli², Ye Yakang², Hui Bo², Chen Wei²

(1.School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China; 2.Technology Innovation Center of Rare Earth Resources Development and Utilization, China Geological Survey, Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Kvanefield REE deposit is a world-class REE deposit, which is located at the northern margin of the Ilímaussaq complex in the central part of Gardar igneous province, southwestern Greenland. The intrusion controlling ore is the mesoproterozoic Ilímaussaq complex, where two main varieties of metallogenic parent rocks are distinguished, green aegirine lujavrite and black arfvedsonite lujavrite, which all are agpaitic alkaline rocks, defined as a peralkaline nepheline syenite. The ore bodies are controlled by fractures or interlayer-gliding surfaces, which consist of sodalite lujavrite pegmatite veins and layered arfvedsonite lujavrite. According to mineral assemblage and occurrence form, the ores are divided into arfvedsonite-albite-steenstrupine type and sodalite-aegirine-eudialyte type. Specifically, steenstrupine and eudialyte are the main bearing rare earth element minerals in the two ores. The steenstrupine have varying $\omega(\text{REO})$ contents ranging from 31.5% to 44.9%, with an average of 35.9%, and stone LREE, U and Th enrichment, moreover, which are easily replaced by monazite and uranothorite. In addition, eudialyte have stable $\omega(\text{REO})$ contents ranging 1.41% to 1.90%, riching HREE, Nb, and Ta. Two mode of rare earth element occurrence are distinguished in eudialyte, isomorphism and other finely mineral inclusions such as monazite and steenstrupine. With alkaline complex multi-stage diagenesis process of rock mass and alkaline magma in aegirine lujavrite stage of magmatic hydrothermal mineralization and arfvedsonite lujavrite stage magma and mineralization, and form tratiiform-lenticular structure on the whole, diagenetic-mineralization model has a different source, multi-stage, with an invasion characteristics.

Keywords: Ilímaussaq; Agpaitic alkaline rocks; Rare earth element; Greenland

(上接第 9 页)

Geological Characteristics, Genetic Types and Utilization Value of Yonghong Fluorite Deposit in Mabian Area, Southwest Sichuan and Its Enlightenment to Regional Prospecting

Wen Jun^{1,2,3}, Zhao Wei^{1,2}, Li Fuyong¹, Zhu Helin^{1,2}, Zhang Hangfei^{1,2}, Zhang Jinyuan^{1,2}

(1.No.207 Geological Tem of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Leshan, Sichuan, China;

2.Zhang Jinyuan model worker Innovation Studio of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Leshan, Sichuan, China; 3.Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Sichuan is an area where there are no fluorite deposits and no fluorite metallogenic belts. The discovery of medium-sized fluorite deposit in Mabian area is of great significance. Through field geological investigation and collection and analysis of geological data, the genesis of Yonghong Fluorite deposit in Mabian area and its enlightenment to regional prospecting are discussed. The results showed that the ore body occurs in the siltstone of Qiongzhusi Formation of Cambrian Terreneuvian, which is strictly controlled by fault. The metallogenic factors are dolomite, limestone, fluorine-containing phosphorites and fault, and there are no volcanic rock and intrusive rock. The five subtypes of hydrothermal filling type fluorite deposits summarized by predecessors have volcanic rock or intrusive rock. Therefore, it is summarized as a new subtype of hydrothermal filling fluorite type deposit-Yonghong subtype of hydrothermal filling type fluorite deposit (fault+carbonate rock+fluorophosphate); Yonghong fluorite deposit in Mabian area is a medium-sized fluorite deposit with an identified resource of 450000 t and its average content of CaF_2 was 34.61%; Through the comparative analysis of metallogenic factors, Mabian-Leibo-Jinyang areas on Ebian-Jinyang fault zone have good fluorite prospecting prospects. The above results are of great significance to fill the gap of fluorite without metallogenic belt in Sichuan, guide the regional prospecting of Ebian-Jinyang fault zone and promote the economic development of Wumeng Mountains region.

Keywords: Fluorite ore; Ebian-Jinyang fault; Qiongzhusi formation; Dengying formation; Hydrothermal filling type; Development value