

地质与矿产

山东莱芜—淄博地区稀土矿成矿规律及找矿前景

杨斌, 罗文强, 辛浩, 唐璐璐, 梁吉坡, 倪永进, 仵康林, 常杰*

(山东省地质科学研究所, 国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013)

摘要:山东莱芜—淄博地区位于华北克拉通东缘, 构造活动强烈, 岩浆作用频繁, 具有良好的成矿地质背景, 是我国近年来稀土找矿的重要潜在区域之一。然而, 关于该区稀土矿化的物质来源、成矿机制及成矿时代仍存在较大不确定性。本研究在全面收集分析以往各类地质资料基础上, 采用地质测量、物探、槽探和采样分析测试等综合勘查手段, 大致确定矿(化)体的分布与产出特征、矿石质量特征, 分析总结了研究区碳酸岩型稀土矿成矿条件、成矿规律, 研究认为本区稀土矿均为与中生代燕山晚期碳酸岩有关的岩浆热液型轻稀土矿床, 与稀土矿成矿关系较密切的侵入岩主要为中生代腰关单元斑状蛭石化含磷灰石云母岩、鹿野单元碳酸岩, 并圈定胡家庄-东南峪、北岭子-南双王以及栾宫-南王庄等3处稀土矿找矿靶区。

关键词:稀土矿; 碳酸岩; 成矿规律; 找矿预测; 莱芜—淄博地区; 山东

中图分类号: P618.7

文献标识码: A

doi: 10.12128/j.issn.1672-6979.2025.09.004

0 引言

稀土元素(Rare Earth Elements, REEs)因其独特的地球化学性质, 在高端制造、新能源技术、电子信息、航空航天等领域具有重要战略价值^[1]。随着全球科技产业的快速发展, 稀土资源的需求不断上升, 特别是在绿色能源、国防工业等关键领域, 稀土供应的安全性已成为各国关注的焦点^[2]。中国是全球稀土资源最为丰富的国家之一, 具有多种类型的稀土矿床^[3], 碳酸岩型、碱性岩型、氧化铁铜金型、热液脉型等内生稀土矿床以及风化壳离子吸附型、沉积岩型、沉积矿产伴生型等外生稀土矿床^[4-9]。

山东莱芜—淄博地区位于华北克拉通东部陆块与胶东造山带的过渡带, 经历了多期构造—岩浆作用的叠加改造, 区内发育一系列中生代花岗岩体、碱性—过碱性岩及热液矿床, 具备良好的稀土成矿条件, 是我国近年来稀土找矿的重要潜在区域之一^[4]。已有研究表明, 该区部分稀土矿化可能与燕山期岩浆活动密切相关, 特别是碱性侵入体和花岗岩型矿

床中的稀土富集现象较为明显^[5]。然而, 关于该区稀土矿化的物质来源、成矿机制及成矿时代仍存在较大不确定性, 制约了对其成矿规律的深入理解, 也影响了未来的找矿工作布局。

本研究在全面收集分析以往各类地质资料基础上, 采用地质测量、物探、槽探和采样分析测试等综合勘查手段, 大致查明含稀土矿的碳酸岩岩体(脉)的含矿性, 对具有找矿前景的碳酸岩体(脉)开展验证工作, 大致确定矿(化)体的分布与产出特征、矿石质量特征, 评价稀土矿找矿前景。本研究不仅有助于完善华北克拉通东部稀土成矿理论体系, 也为该区稀土资源的勘查与开发提供科学依据, 推动我国战略性矿产资源的可持续利用。

1 区域地质背景

研究区大地构造位置以文祖断裂为界(图1), 西侧属泰山—济南断隆(II a_1)泰山凸起(II a_1^{δ}); 东侧属鲁山—邹平断隆(II a_2)博山凸起(II a_2^2)^[6]。区域以脆性断裂构造为主, 呈扇形放射状, 新太古代及中生

收稿日期: 2025-03-04; 修订日期: 2025-03-21; 编辑: 王敏

基金项目: 山东省地质勘查项目“山东省莱芜—淄博地区碳酸岩型稀土矿调查”(鲁勘字[2022]10号)

作者简介: 杨斌(1975—), 男, 山东梁山人, 研究员, 主要从事地质调查与矿产勘查工作; E-mail: 13954154239@163.com

* 通信作者: 常杰(1970—), 女, 山东烟台人, 工程师, 主要从事地质调查与矿产勘查工作; E-mail: 99119520@qq.com

代岩浆岩发育,碳酸岩脉则多分布于断裂放射收敛部位,具有较好的稀土矿找矿前景。

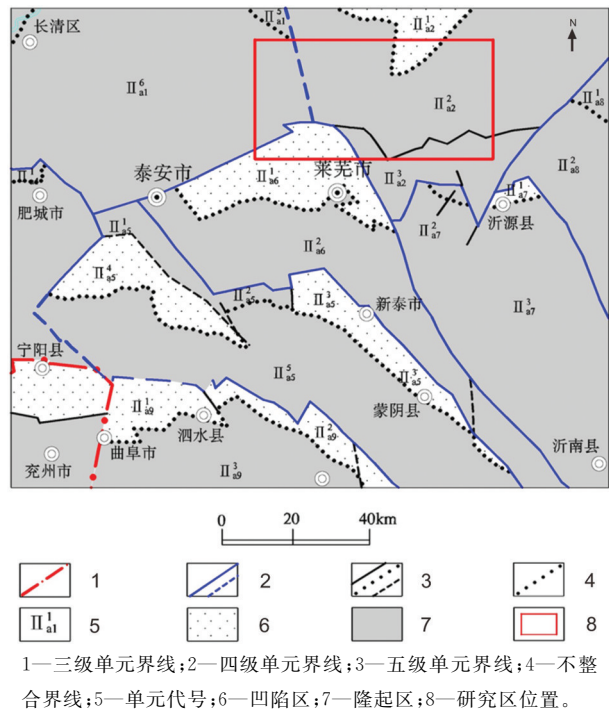


图 1 研究区大地构造位置图(据张增奇等^[6]修改)

2 研究区成矿地质特征

2.1 地层

研究区由老到新发育有新太古代泰山岩群、寒武纪长清群、寒武-奥陶纪九龙群、奥陶纪马家沟群、石炭-二叠纪月门沟群、二叠纪石盒子群、三叠纪石千峰群、侏罗纪淄博群、白垩纪莱阳群、青山群、古近纪官庄群、新近纪临朐群、黄骅群、巴漏河组及第四系^[7]。

与稀土成矿关系密切的地层为早古生代寒武-奥陶纪地层、晚古生代石炭-二叠纪地层。区内鹿野单元侵入体呈岩床侵入馒头组石店段中;在莱芜和庄乡嵩泉南有近 SN 向碳酸岩脉侵入于炒米店组和三山子组;在博山区北博山镇东北庵庄组中有呈 NNE 向沿断裂侵入的碳酸岩脉发育;在淄博市博山区八陡镇南偏东五阳山组中,有近 EW 向碳酸岩岩筒发育(八陡岩筒);在章丘区普集镇西南青龙山有腰关单元的蛭石岩沿 SN 向断裂侵入于二叠纪石盒子群中,并形成内生岩浆岩黑云母岩型低品位磷灰石和风化水化型蛭石小型矿床或矿点。

2.2 构造

研究区 NNW、NW 向断裂与碳酸岩体的展布密切相关,主要包括鹿野-孙祖断裂、文祖断裂、白泉庄-五色崖断裂、金山-姚家峪断裂。NNW 向断裂是本区规模较大、变形强烈的主干构造之一,延伸远,走向稳定,断层南端常与 NW 向断裂复合,对本区构造格局影响较大。沿断裂有白垩纪岩浆侵入,古近纪仍在活动。文祖断裂、白泉庄-五色崖断裂均具有一致的几何特征、变形特征和变形机制及构造演化史。该组断裂至少经历了两期继承性构造活动,早期为强烈的张性活动、后期为左行压扭性运动。

2.3 岩浆岩

研究区岩浆岩活动频繁,以早前寒武纪侵入岩为主^[8],约占侵入岩面积的 95%。中元古代以后岩浆活动频度降低,规模较小,多为呈岩株、岩床及岩脉组成的杂岩体,其与稀土矿化关系极为密切。主要发育有新太古代南官庄单元中细粒变辉长岩(斜长角闪岩)、上港单元中粒含黑云奥长花岗质片麻岩;大众桥单元中粒黑云石英闪长岩、窝铺单元中粒黑云英云闪长岩;邱子峪单元巨斑状细粒含黑云二长花岗岩、望母山单元斑状中粒二长花岗岩、松山单元中粒二长花岗岩等。

在研究区莱芜-淄博一带的八陡、乐疃、东石马、胡家庄、雪野等地分布有大量碳酸岩体。研究区碳酸岩在大地构造位置上位于华北板块东南部,处于郯庐断裂西侧鲁西断隆区。在东西长约 65 km,南北宽约 33 km 的范围内分布有近百个岩体出露点,多呈层状侵入于沉积地层中,矿体与围岩产状基本一致,界线明显。主要岩性为碳酸云母岩、云母碳酸岩和云母碳酸角砾岩等。与世界典型碳酸岩体相比,研究区碳酸岩普遍形态简单、规模小,多以岩床、岩脉为主,少数为岩筒,同时缺少与之共生的碱性超基性岩。淄博-莱芜碳酸岩的围岩主要是太古界基底变质岩系和古生界的海相碳酸盐岩。淄博市博山区石马-莱芜胡家庄地区发育与稀土矿成矿关系密切的中生代燕山期蛭石化含磷灰石云母岩和碳酸岩,属雪野序列鹿野单元碳酸岩和腰关单元斑状蛭石化含磷灰石云母岩。

3 区域地球物理特征

3.1 航空放射性测量

稀土矿形成过程中通常会伴生铀、钍等放射性元素。放射性元素衰变时会释放出 γ 射线, γ 射线与物质作用会产生次级电子, 通过测量, 次级电子的能量能够反映 γ 射线的能量, 进一步就能反算放射性元素的含量。稀土含量与钍、铀含量呈正相关关系, 因此品位高的稀土矿体引起的放射性异常也较高。

1959 年地质部物探局航测大队 902 分队在鲁中及东部地区开展 1:10 万航空放射性测量(图 2)。莱芜—淄博地区航空放异常值主要在 0~36 γ , 其中超高值区主要分布在研究区的西部石屋子—大朱山, 中部郭家楼—口镇、石门—黑山及东部幸福庄—上郝峪

一带, 放射性异常 >36 γ , 超出仪器记录范围, 区内稀土矿找矿前景较好, 已圈定富家庄—高家庄、阁老村—西周峪、西崑石、腰关等成矿有利地段; 高值区主要分布在西部富家庄—五色崖—望鲁山、东南部南博山—上郝峪一带, 放射性异常在 14~36 γ , 区内圈定的东南峪、罗圈、五色崖、南博山等成矿有利地段; 低值区位于研究区的北部及东部, 放射性异常在 0~16 γ , 除博山区的东北部, 及石马村—丁家南峪、城子村、明月泉村等局部地段存在弱放射异常外, 无明显航空放射性异常存在。济南市地质局第二地质队以往在胡家庄地区所开展的 1:5 万放射性测量工作显示, 该地区异常强度为 30~40 γ , 最高强度大于 100 γ , 异常与 3 个稀土矿体套合较好。

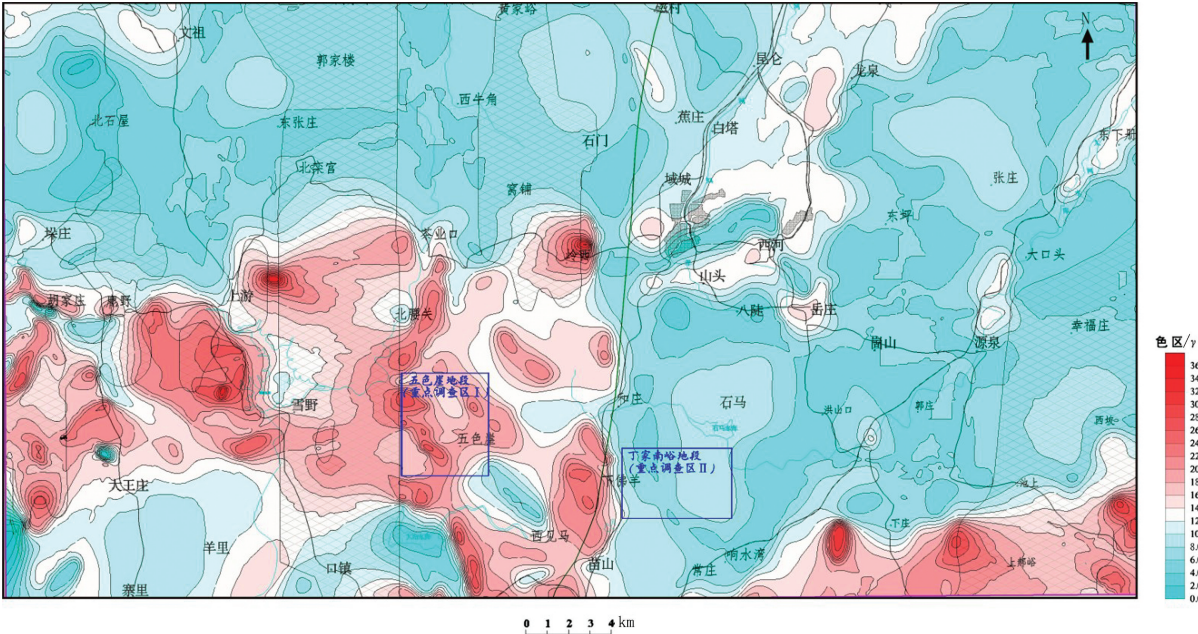


图 2 山东省莱芜—淄博地区航空放射性异常综合平面图

3.2 地面放射性异常

五色崖地段完成 1:10 000 γ 能谱测量 33.7 km², 钍含量数值介于 (0.0~120.0) $\times 10^{-6}$, 异常反映相对较好。尤其是在五色崖断裂的两侧均形成具有一定规模, 且连续性较好的钍高异常区, 钍含量数值介于 (45.0~95.0) $\times 10^{-6}$, 该区主要为新太古代晚期傲徕山序列蒋峪及松山单元二长花岗岩, 该钍高放射性异常与二长花岗岩关系密切。铀含量数值介于 (0.0~19.0) $\times 10^{-6}$, 除五色崖断裂的西南部明显的铀高异常外, 该区异常整体反映相对较弱。钾含量数值介于 0.0%~6.5%, 异常反映整体相对

较弱, 区内存在多条 NW 向条带状钾高异常区, 钾含量数值介于 5.0%~6.5%, 主要源于新太古代燕山晚期傲来山序列二长花岗岩引起的钾高放射性异常。

丁家南峪地段完成 1:10 000 γ 能谱测量 30.3 km², 该研究区位于金山—姚家峪断裂以东, 区内大部为奥陶纪沉积岩, 南部少量出露寒武纪沉积岩, 其放射性背景较花岗岩分布区普遍较低, 但局部连续的放射性异常较为明显。区内钍异常呈近 EW 向带状分布, eTh 含量相对较高, 钍含量数值介于 (10.0~30.0) $\times 10^{-6}$, 虽然峰值相对偏低, 但连续性相对较好。地表主要出露寒武—奥陶纪沉积岩, 其放

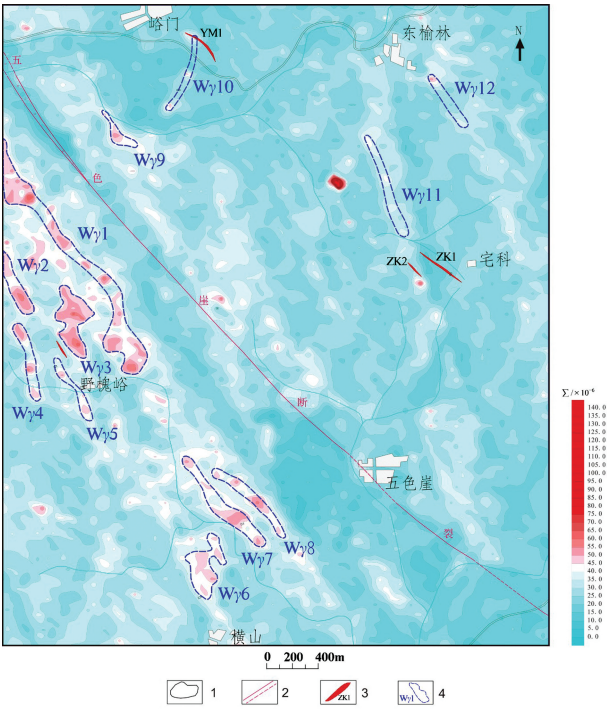
射性可能与局部放射性矿物富集有关。铀、钾无明显高异常,整体反应较弱。总道 Σ 含量相对高背景区以钍、钾两元素为主,区内异常呈近 EW 向带状分布。

通过本次 γ 能谱测量可知,研究区内 eU、K 元素放射性较低,总道 Σ 以 eTh 为主,因此根据异常

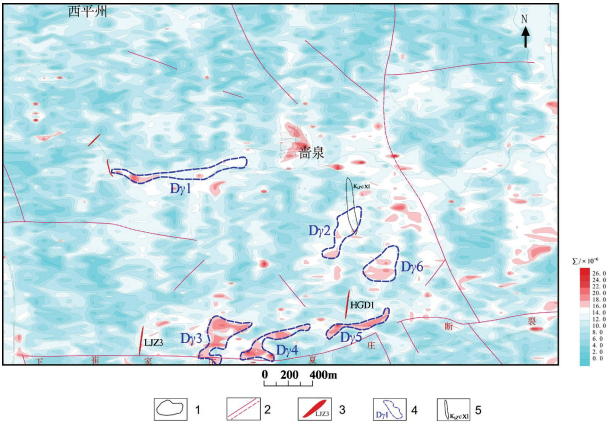
的圈定原则,以总道 Σ 含量图圈定放射性综合异常。研究区内共圈定放射性异常 18 处(表 1),其中五色崖重点区圈定异常 12 处(图 3),编号 W γ 1~W γ 12,丁家南峪重点区圈定异常 6 处(图 4),编号 D γ 1~D γ 6。

表 1 研究区放射性异常特征

异常编号	异常位置	面积/ km ²	异常特征	地表岩性
W γ 1	研究区西部,五色崖断裂—野槐峪一带	0.4	NW 向条带状展布,该异常以 eTh、K 元素为主,伴生 eU 元素,总道 Σ 峰值为 62.5×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 92.4×10^{-6} ,K 元素峰值为 6.1%	新太古代晚期傲徕山序列松山单元二长花岗岩
W γ 2	研究区西部,五色崖断裂的西南	0.07	NW 向条带状展布,该异常以 eTh、K 元素为主,伴生 eU 元素,eTh 元素峰值为 73.3×10^{-6}	新太古代晚期傲徕山序列松山单元二长花岗岩
W γ 3	研究区西部,野槐峪村的北部	0.14	不规则状展布,异常以 eTh 元素为主,伴生 eU 元素,总道 Σ 峰值为 65.8×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 85.1×10^{-6}	新太古代晚期傲徕山序列蒋峪单元二长花岗岩
W γ 4	研究区西部,野槐峪村的西北部	0.07	NW 向串珠状展布,异常以 eTh 元素为主,伴生 eU 元素,总道 Σ 峰值为 55.6×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 66.7×10^{-6} ,eU 元素峰值为 7.5×10^{-6}	地表为新太古代晚期傲徕山序列蒋峪单元二长花岗岩
W γ 5	研究区西部,野槐峪村的西部	0.05	NW 向条带状展布,异常以 eTh 元素为主,伴生 K 元素,总道 Σ 峰值为 50.3×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 56.2×10^{-6} ,K 元素峰值为 5.5%	异常的北部发现蛭石化含磷灰石云母岩,异常区为新太古代晚期二长花岗岩
W γ 6	研究区西南部,横山口村的北部	0.12	不规则状展布,异常以 eTh 元素为主,伴生 K 元素,总道 Σ 峰值为 51.1×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 63.2×10^{-6}	异常的边部发现蛭石化含磷灰石云母岩,异常区为新太古代晚期二长花岗岩
W γ 7	研究区西南部,李家楼村一带	0.14	NW 向条带状展布,异常以 eTh 元素为主,伴生 eU 元素,总道 Σ 峰值为 53.6×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 74.2×10^{-6}	异常区为新太古代晚期傲徕山序列二长花岗岩
W γ 8	研究区西南部,李家楼村的东北部	0.08	NW 向条带状展布,以 eTh 元素为主,伴生 K 元素,总道 Σ 峰值为 56.3×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 73.5×10^{-6}	异常区为新太古代晚期傲徕山序列蒋峪单元二长花岗岩
W γ 9	研究区北部,黑山头村的北部	0.04	NW 向条带状展布,异常以 eTh 元素为主,eTh 元素峰值为 83.9×10^{-6}	异常区为新太古代晚期傲徕山序列二长花岗岩
W γ 10	研究区北部,峪门村的南部	0.04	呈 NE 向串珠状展布,该异常以 eTh 元素为主,为具有 3 处异常中心的组合异常,eTh 元素峰值为 70×10^{-6}	区内主要为新太古代晚期傲徕山序列蒋峪二长花岗岩
W γ 11	研究区东部,中榆林前村东南部	0.1	NW 向串珠状展布,该异常以 eTh 元素为主,eTh 异常幅值集中在 $(35 \sim 50) \times 10^{-6}$	区内主要为新太古代晚期傲徕山序列蒋峪二长花岗岩
W γ 12	研究区东北部,东榆林村的东部	0.05	呈 NW 向串珠状展布,异常以 eTh 元素为主,eTh 异常幅值集中在 $(30 \sim 50) \times 10^{-6}$,异常峰值为 56.8×10^{-6}	区内主要为新太古代晚期傲徕山序列蒋峪二长花岗岩
D γ 1	研究区中部,草庙头村—丁家南峪一带	0.15	近 EW 向条带状展布,该异常以 eTh 元素为主,伴生 eU 元素,总道 Σ 峰值为 21.8×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 24.2×10^{-6} ,eU 元素峰值为 4.1×10^{-6}	该异常西部大致对应马家沟群北庵庄组、东黄山组与九龙群三山子组 a 段的接触部位,异常的东部存在近 EW 向碳酸岩脉
D γ 2	研究区中部,张家台村一带	0.12	NE 向条带状展布,为具有多处异常中心的组合异常,该异常以 eTh 元素为主,伴生 eU 元素,总道 Σ 峰值为 16.5×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 14.2×10^{-6} ,eU 元素峰值为 5.2×10^{-6}	以寒武纪九龙群炒米店组为主,且该异常内存在近 SN 向碳酸岩
D γ 3	研究区南部,栾家庄村一带	0.15	NW 向不规则状展布,该异常以 eTh、eU 元素为主,总道 Σ 峰值为 20.9×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 16.2×10^{-6} ,eU 元素峰值为 5.3×10^{-6}	该异常位于下崔家庄—夏庄断裂的北邻,地表岩性以寒武纪沉积岩为主
D γ 4	研究区南部,古德范水库以北	0.10	NE 向条带状展布,该异常以 eTh、eU 元素为主,总道 Σ 峰值为 20.9×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 22.2×10^{-6} ,eU 元素峰值为 4.4×10^{-6}	寒武纪沉积岩
D γ 5	研究区中南部,D γ 4 异常的东部	0.07	NEE 向条带状展布,该异常以 eTh 元素为主,总道 Σ 峰值为 20.7×10^{-6} ,eTh 元素峰值为 22.2×10^{-6}	寒武纪沉积岩
D γ 6	研究区中部,张家台村的南部	0.12	呈椭圆形展布,以 eTh、eU 元素为主,eTh 元素峰值为 20.2×10^{-6} ,eU 元素峰值为 4.2×10^{-6}	寒武纪九龙群炒米店组



1— γ 能谱测量 eTh 含量等值线;2—实测及推断断裂;3—矿(化)体范围及编号;4—异常范围及编号。
图 3 五色崖地区 γ 能谱测量异常平面图



1— γ 能谱测量 eTh 含量等值线;2—实测及推断断裂;3—矿化体范围及编号;4—异常范围及编号;5—鹿野单元碳酸岩。
图 4 丁家南峪地区 γ 能谱测量异常圈定平面图

4 矿化体特征

淄博—莱芜地区碳酸岩型稀土矿的矿脉主要赋存于碳酸盐岩地层和二长花岗岩中。这些岩石通常具有层状结构或发育断裂,层理清晰,为稀土元素的富集提供了良好的地质背景。

矿脉通常沿断裂构造或褶皱构造分布,形成具有一定走向和倾向的稀土矿带。矿脉的形态多样,

包括层状、脉状、网脉状等。其中,层状矿脉最为常见,它们通常沿碳酸盐岩地层界面或层内发育,形成具有一定厚度的稀土矿层。脉状和网脉状矿脉则由断裂构造控制,呈不规则状分布。此外,矿脉的富集程度也受到地层岩性、岩浆活动等多种因素的影响。

5 矿石质量

5.1 矿石成分

矿物成分较为复杂,矿石中富含多种矿物成分,主要包括碳酸盐矿物、稀土矿物、硅酸盐矿物、磷酸盐矿物等。稀土矿物主要有氟碳铈矿、氟碳钙铈矿,两种矿物均以富轻稀土为共同特征。

矿石的主要化学成分为 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 P_2O_5 、 CO_2 ,其次为 REO 、 Al 、 Ba 、 Mn 、 Sr 、 Ti 等,有很少量的 Zr 、 Na 、 Nb 、 Cu 、 Pb 、 Ga 等元素。稀土元素是该类矿石的重要特征之一,矿石中富含的稀土元素主要包括镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)等轻稀土元素,以及钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu)等重稀土元素。这些稀土元素通常以离子形式或化合物形式存在于碳酸盐矿物中。

5.2 矿石品位

在淄博—莱芜地区,碳酸岩型稀土矿的矿石品位受到多种因素的影响,包括矿床的成因、地质构造、岩浆活动以及矿石的矿物组合等。因此,不同地区的碳酸岩型稀土矿矿石品位存在一定的差异。本次调查发现的稀土矿脉矿石中稀土氧化物(TRE_2O_3)含量 $0.50\% \sim 2.56\%$,平均品位 0.84% 。

5.3 稀土配分特征

淄博—莱芜地区碳酸岩型稀土矿的稀土总量较高(图 5),轻、重稀土分馏明显, ΣREE 介于 $(1\,151 \sim 14\,291) \times 10^{-6}$,尤其富集轻稀土, $\text{LREE}/\text{HREE} = 21.45 \sim 33.35$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 90.57 \sim 266.78$,其中重稀土的分异较为显著, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 10.88 \sim 19.54$,而轻稀土的分异相对较弱, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 5.66 \sim 11.67$ 。岩石具有弱铕负异常($\delta\text{Eu} = 0.8 \sim 0.90$),碳酸岩型稀土矿的这些稀土元素特征表明它们具有相同的岩浆源区。淄博—莱芜地区碳酸岩型稀土矿的稀土元素组成特征除总量上存在一定差别,其分配特征基本一致。

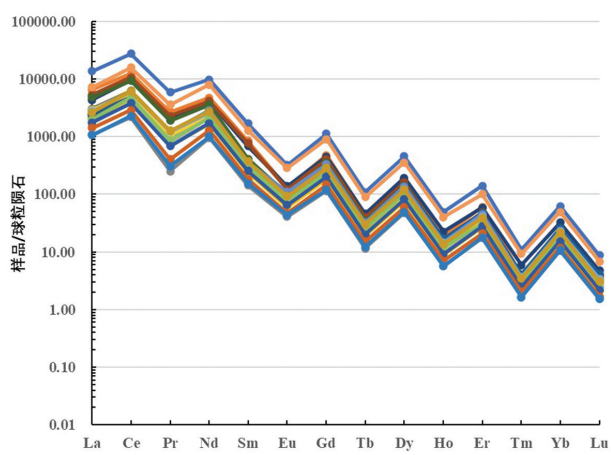


图 5 碳酸岩型稀土矿稀土元素球粒陨石标准化配分图

碳酸岩型稀土矿微量元素亏损 Rb、Pb，高场强元素 Ta、Hf 的含量均显著偏低，而 La、Ce、Nd 等元素明显富集(图 6)，Ta 的相对亏损可能是壳源围岩的加入造成的^[9]。研究区碳酸岩型稀土矿的微量元素组成特征则存在一定差别，但总体变化规律一致。

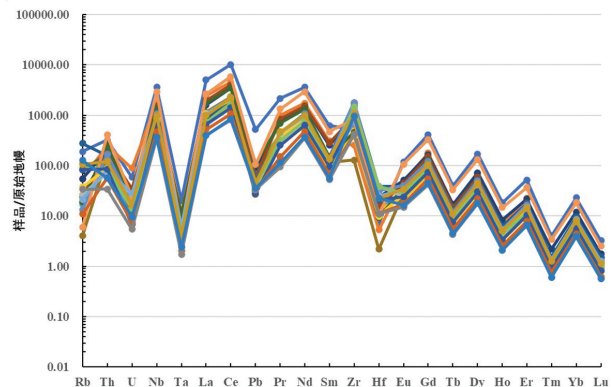


图 6 碳酸岩型稀土矿微量元素原始地幔标准化蛛网图

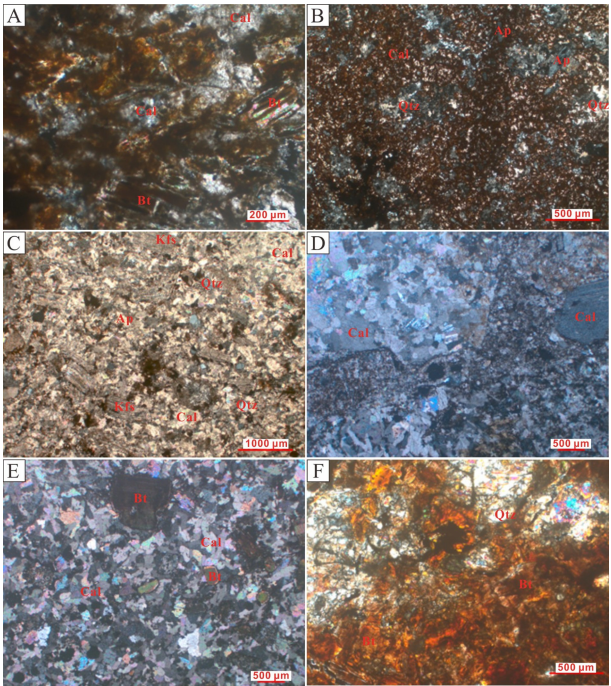
5.4 矿石类型

矿石自然类型主要有碳酸云母岩、磷灰石碳酸岩、含磷灰石云母碳酸岩、角砾状碳酸岩、碳酸岩、云母岩(图 7)。

(1)碳酸云母岩:细粒结构,块状构造。岩石主要由黑云母、方解石、磷灰石、不透明矿物等组成,构成岩石主要矿物粒径一般为 0.1~2.0 mm,有的可达 4.0 mm,多呈细粒结构。

(2)磷灰石碳酸岩:微粒结构,块状构造。岩石主要由方解石、磷灰石、石英、不透明矿物等组成,构成岩石主要矿物粒径一般 0.02~0.2 mm,呈微粒结构。

(3)含磷灰石云母碳酸岩:微粒结构,块状构造。



A—碳酸云母岩;B—磷灰石碳酸岩;C—含磷灰石云母碳酸岩;D—角砾状碳酸岩;E—碳酸岩;F—云母岩;Cal—方解石;Bt—黑云母;Qtz—石英;Ap—磷灰石;Kfs—钾长石。

图 7 研究区不同矿石类型的显微照片

岩石主要由方解石、钾长石、磷灰石、石英、黑云母、不透明矿物等组成,构成岩石主要矿物粒径一般为 0.02~0.2 mm,呈微粒结构。

(4)角砾状碳酸岩:角砾结构,块状构造。岩石主要由碳酸岩质角砾被铁质钙质胶结而成,角砾粒径一般为 2.0~20.0 mm,多呈不规则状。

(5)碳酸岩:细粒结构,块状构造。岩石主要由方解石、黑云母、磷灰石、石英、不透明矿物等组成,构成岩石主要矿物粒径一般 0.1~2.0 mm,呈细粒结构。

(6)云母岩:细粒结构,块状构造。岩石主要由黑云母、石英、长石、不透明矿物等组成,构成岩石主要矿物粒径一般为 0.1~1.0 mm,呈细粒结构。

6 找矿前景

6.1 矿石类型

在成矿条件方面,断裂构造、岩体接触带构造及围岩的层间滑动带和层间破碎带等被活化,它们成为热流体运移的通道和场所,为成矿物质的进一步聚集提供了有利的储矿空间。莱芜—淄博地区的碳酸岩型稀土矿以及磷矿等,都是幔源流体分异演化

后不同阶段的产物。

(1) 岩浆作用: 碳酸岩型稀土矿床的成矿过程通常与岩浆作用紧密相连, 特别是碱性岩浆系统的演化。这类岩浆富含挥发分(如 CO_2 、F、Cl 等), 在冷却、结晶过程中, 由于分异作用和流体-熔体相互作用, 导致稀土元素在特定条件下高度富集, 并最终形成氟碳铈矿等稀土矿物^[10]。莱芜-淄博地区的碳酸岩型稀土矿床可能源于此类岩浆活动, 特别是在岩浆晚期的演化阶段, 如岩浆房顶部的残余熔体或晚期岩浆流体的作用。

(2) 流体活动: 碳酸岩型稀土矿床的成矿流体具有复杂的成分, 除 H_2O 、 CO_2 、NaCl 外, 还包含 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 等离子。这些流体可能源自岩浆脱气、地壳深部流体的上升, 或是地表水与地下岩浆/热液系统的相互作用^[11]。在莱芜-淄博地区, 存在适宜的流体活动网络, 如断裂构造系统, 使得富含稀土元素的流体得以运移、富集并形成矿床。

(3) 物理化学环境: 碳酸岩型稀土矿床的形成要求特定的温度、压力、pH 以及氧化还原条件^[12]。成矿环境一般为中低温至高温(数百至数千摄氏度)、中低压力(数十至数百兆帕), 且倾向于还原环境。在莱芜-淄博地区, 存在着这样的地质环境窗口, 特别是在深度适中、构造活动活跃的部位, 有利于稀土元素的稳定存在、迁移与沉淀。

(4) 矿床定位因素: 碳酸岩型稀土矿床的形成往往受到构造控制, 如断裂、褶皱、岩墙侵入等提供矿物流体的通道和富集场所。莱芜-淄博地区的碳酸岩型稀土矿床位于有利的构造部位, 如断裂交会处、岩浆侵入体边缘、地层不整合面附近等, 这些构造有助于流体的汇聚、滞留和稀土矿物的沉淀。

综上所述, 莱芜-淄博地区碳酸岩型稀土矿床的地质背景主要包括特定的地壳构造位置、相关的岩石类型与地层序列以及特定的区域地质演化史; 而成矿条件则涉及岩浆作用、复杂的流体活动、特定的物理化学环境以及有利的矿床定位因素。总的来说, 莱芜-淄博地区的碳酸岩型稀土矿地质背景复杂, 成矿条件优越。

6.2 成矿机制

矿体赋存于岩体及其内外接触带、断裂构造、岩床上下附近围岩及其他有利赋矿构造部位。在淄博-莱芜地区体现南北串状、东北带状展布。

研究区内已发现查明的稀土矿均为与中生代燕山晚期碳酸岩有关的岩浆热液型轻稀土矿床^[13]。燕山晚期, 鲁西地区构造活动强烈, 中偏碱性岩浆活动频繁, 为稀土元素的运移富集提供了充足的热源和热液。上升的地幔物质——碱性岩、碳酸岩岩浆沿板内深大断裂上升运移, 上侵过程中携带其中的轻稀土元素, 在岩浆活动后期形成的岩浆热液中, 稀土元素进一步富集, 形成含稀土的成矿热液, 在成矿期及前期断裂、围岩裂隙及地层层间裂隙带中充填交代形成稀土矿(化)体, 成矿物质来源主要来自富集地幔。

中生代侵入体不断侵入上升, 其内的含矿热液遇构造裂隙, 压力快速释放, 并沿构造裂隙、围岩裂隙及地层层间裂隙带快速充填, 致使稀土元素富集, 研究区断裂及其次级构造、及地层层间裂隙发育, 且具有继承性多期活动, 为成矿热液的运移、沉淀成矿提供了有利的通道和空间。

控矿构造对稀土矿的控制作用是多方面的, 尤其对不同级别成矿单元的形成以及矿床类型方面的控制尤为突出。金山-姚家峪断裂、白泉庄-五色崖断裂、文祖断裂、鹿野-孙祖断裂及其次级断裂则控制了含稀土碳酸岩、蛭石化含磷灰石云母岩的分布。

中生代燕山期的碳酸岩脉、碳酸云母岩脉、蛭石化含磷灰石云母岩等碱性岩体与稀土矿成因关系密切, 其形成和产出为稀土矿床形成提供了巨大的热源, 为成矿物质的迁移、富集以及稀土矿床集中区的定位起着决定性的作用。稀土矿体主要赋存于杂岩体内及其附近围岩中, 远离杂岩体则无矿化现象; 岩体的边缘相部位有利于成矿。

7 找矿靶区

找矿靶区是指通过矿产地质调查, 依据地质、物探、化探、遥感、勘查、科研等资料, 综合分析成矿地质条件和找矿标志, 与已知矿床找矿预测模型吻合程度高, 成矿条件有利、资源潜力较大、预测依据充分, 预期可发现新的矿产资源的地区^[14]。

研究区碳酸岩型稀土矿找矿靶区根据地质条件、矿化特征、地球物理和地球化学异常等多个因素进行划分^[15], 分为: 具有明确的矿化显示和丰富的地质信息, 地球物理和地球化学异常显著, 成矿条件优越, 找矿前景极大的 A 类靶区; 具有一定的矿化显示和地质依据, 地球物理和地球化学异常较明显,

有一定的找矿潜力的 B 类靶区;地质条件有利,但矿化显示不明显,地球物理和地球化学异常较弱或不确定,需要进一步工作的 C 类靶区(表 2)。

表 2 莱芜—淄博研究区稀土矿找矿靶区特征

名称	级别	面积/ km ²	圈定依据	靶区 形状
胡家庄-东南峪靶区	B 类	39.32	位于东南峪—胡家庄—竹园子一带,区内放射性异常规模大,连续性好,峰值高,存在明显的航放、化探、重砂异常。区内发育多条雪野序列腰关单元蛭石化含磷灰石云母岩脉和鹿野单元碳酸岩脉。靶区内圈定 4 条稀土矿脉,1 条稀土矿化脉	近 SN 向 多边形
北岭子-南双王靶区	C 类	30.93	位于北岭子—南双王一带,区内放射性异常规模大,连续性好,峰值高,存在明显的航放、化探、重砂异常。区内发育多条雪野序列腰关单元蛭石化含磷灰石云母岩脉。靶区内圈定 3 条稀土矿脉,1 条稀土矿化脉	近 EW 向 多边形
栾宫-南王庄靶区	C 类	37.51	位于南栾宫—北栾宫—阁老—中茶叶—南王庄一带,区内放射性异常规模大,连续性好,峰值高,存在明显的航放、化探、重砂异常。区内发育多条雪野序列腰关单元蛭石化含磷灰石云母岩脉和鹿野单元碳酸岩脉,且走向延长较大。靶区内圈定 1 条稀土矿脉,4 条稀土矿化脉	近 EW 向 多边形

本次找矿靶区圈定是在综合分析区内收集的物、化探成果及地质资料基础之上,结合稀土矿成矿规律以及靶区圈定原则,以本次工作新圈定的稀土矿(化)体分布区为基础,圈定 3 处稀土矿找矿靶区(表 2),其中胡家庄-东南峪靶区为 B 类,北岭子-南双王靶区和栾宫-南王庄靶区 2 处靶区为 C 类。

8 结论

(1)研究区稀土矿均为与中生代燕山晚期碳酸岩有关的岩浆热液型轻稀土矿床,与稀土矿成矿关系较密切的侵入岩主要为中生代腰关单元斑状蛭石化含磷灰石云母岩、鹿野单元碳酸岩。

(2)本研究共圈定了 3 处稀土矿找矿靶区,其中胡家庄-东南峪靶区为 B 类、北岭子-南双王靶区和栾宫-南王庄靶区 2 处靶区为 C 类,为下一步找矿方向与工作布置提供了重要参考与指导意义。

参考文献:

[1] 谢玉玲,夏加明,崔凯,等. 中国碳酸岩型稀土矿床:时空分布与成矿过程[J]. 科学通报,2020(65):3794-3808.

[2] 李胜虎,熊玉新,王海芹,等. 鲁西微山稀土矿床成矿机制研究现状 & 展望[J]. 山东国土资源,2023,39(11):32-41.

[3] 毛景文,宋世伟,刘敏,等. 稀土矿床:基本特点与全球分布规律[J]. 地质学报,2022,96(11):3675-3697.

[4] 翁强,牛贺才,杨武斌,等. 川西碱性岩-碳酸岩型稀土矿床成矿模型[J]. 矿物岩石地球化学通报,2022,41(3):465-473.

[5] 范宏瑞,徐亚,杨奎锋,等. 内蒙古白云鄂博矿床碳酸岩侵位方式与三维形态及稀土潜在资源[J]. 岩石学报,2022,38(10):2901-2919.

[6] 李胜虎,于学峰,田京祥,等. 碳酸岩型稀土矿床成矿流体演化机制研究现状 & 展望[J]. 中国地质,2021,48(2):447-459.

[7] 饶灿,王吴梦雨,王琪,等. NYF 型伟晶岩岩浆-热液演化与稀有稀土金属超常富集[J]. 地学前缘,2023,30(5):106-114.

[8] 侯谦,寸玲,聂飞,等. 四川攀西地区铜厂沟离子型稀土矿点的发现及对找矿勘查的启示[J/OL]. 地质通报[2025-03-31].

[9] 罗香建,覃英,龚大兴,等. 贵州西部古陆相沉积型稀土资源成矿特征与潜力[J/OL]. 古地质量学报[2025-03-31].

[10] 张鹏,兰君. 鲁西地区稀土矿成矿模式及矿床成因探讨[J]. 山东国土资源,2020,36(3):15-19.

[11] 刘书锋,邵艳琴,刘鑫冉,等. 山东莱芜—淄博地区中生代雪野序列岩体成岩成矿机制[J]. 地质学刊,2022,46(4):335-350.

[12] 张增奇,张成基,王世进,等. 山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见[J]. 山东国土资源,2014,30(3):1-23.

[13] 章森桂,张允白,严惠君.《中国地层表》(2014)正式使用[J]. 地层学杂志,2015,39(4):359-366.

[14] 王世进,万喻生,张成基,等. 鲁西地区早前寒武纪地质研究新进展[J]. 山东国土资源,2008,32(1):10-20.

[15] 李霄琦,赵燕,张瑞英,等. 扬子北缘后河杂岩花岗岩类及其对古元古代造山作用的响应[J]. 岩石矿物学杂志,2025,44(1):24-50.

[16] ANENBURG M, MAVROGENES, J A, FRIGO C, et al. Rare earth element mobility in and around carbonatites controlled by sodium, potassium, and silica [J]. Science advances, 2020,41(6):6570.

[17] ZHANG W, CHEN W T, MERNAGH T P, et al. Quantifying the nature of ore-forming fluids in the Dalucao carbonatite-related REE deposit, Southwest China: implication for the transport and deposition of REEs[J]. Miner Deposita, 2022,57:935-953.

[18] 郑旭,刘琰,欧阳怀,等. 川西冕宁木落寨碳酸岩型稀土矿床流体演化对成矿的制约:来自包裹体和稳定同位素的证据[J]. 岩石学报,2019,35(5):1389-1406.

[19] 王继芳,安茂国,徐然,等. 鲁中隆起区稀土矿成矿地质特征及找矿前景分析[J]. 山东国土资源,2022,38(11):1-14.

[20] 牛金. 昆嵛山岩体东缘金矿成矿规律研究及找矿靶区划分[J]. 山东国土资源,2022,38(4):14-22.

[21] 叶天竺. 勘查区找矿预测理论与方法[M]. 北京:地质出版社,2014.

**Analysis on Metallogenic Regularity and Prospecting Prospects
of Rare Earth Deposits in Laiwu—Zibo Area in Shandong Province**

YANG Bin, LUO Wenqiang, XIN Hao, TANG Lulu, LIANG Jipo, NI Yongjin, WU Kanglin, CHANG Jie

(Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Natural Resources, Key Laboratory of Metallogenic Geological Processes and Resources Utilization in Shandong Province, Shandong Institute of Geological Sciences, Shandong Jīnan 250013, China)

Abstract: Laiwu—Zibo area in Shandong province is located at the eastern margin of the North China Craton. Tectonic activities are strong, magmatic activities are frequent, and geological background for mineralization is favorable. It is one of the critical potential zones for rare earth element exploration in China in recent years. However, there is still significant uncertainty regarding the material sources, mineralization mechanisms, and mineralization ages of rare earth mineralization in this area. On the basis of comprehensive collection and analysis of various geological data in the past, by using geological surveying, geophysical exploration, trenching and sampling analysis testing, distribution and output characteristics of mineral (mineralized) bodies, as well as the quality characteristics of ores have been roughly determined, and the mineralization conditions and laws of carbonate rock type rare earth deposits in the research area have been analyzed and summarized. It is believed that rare earth deposits in this area are all magmatic hydrothermal light rare earth deposits related to carbonate rocks of late Yanshan period in Mesozoic era. The intrusive rocks closely related to rare earth mineralization are mainly porphyritic vermiculite containing apatite mica rock in Mesozoic Yaoguan unit and carbonate rock in Luye unit. Three rare earth mineral exploration target areas have been circled, they are Hujiazhuang – Dong’nanyu exploration target area, Beilingzi – Nanshuangwang exploration target area and Luangong – Nanwangzhuang exploration target area.

Key words: Rare earth deposit; carbonatite; metallogenic regularity; prospecting prediction; Laiwu—Zibo area; Shandong province