

# 鲁西地区稀土矿床成矿系列划分与找矿新突破

兰 君<sup>1)</sup>, 张 鹏<sup>1)</sup>, 孙 莉<sup>2)</sup>, 邢 楠<sup>1)\*</sup>, 李得建<sup>4)</sup>,  
杨云涛<sup>1)</sup>, 李衣鑫<sup>3)</sup>, 肖克炎<sup>2)</sup>, 徐洪岩<sup>1)</sup>, 王 健<sup>1)</sup>

1)山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队, 山东省院士工作站, 山东泰安 271000;

2)中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

3)广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西桂林 541004;

4)山东微山湖稀土有限公司, 山东济宁 277600

**摘 要:** 鲁西地区是我国重要的稀土基地, 目前已发现并评价了 4 个稀土矿(床)点: 微山县郗山特大型稀土矿、枣庄薛城关帝庙稀土矿点、兰陵龙宝山中大型稀土矿、淄博—莱芜地区稀土矿点。根据近年来的研究成果, 厘定出与燕山晚期岩浆有关的与构造-岩浆作用有关的稀土矿床成矿系列。根据稀土矿形成依存的构造-岩浆条件, 该矿床系列形成于整个中生代, 贯穿于燕山晚期, 初步分为一个稀土矿成矿亚系列: 与构造-岩浆及岩浆热液有关的成矿亚系列, 成矿年龄 110~(134.9±1.8) Ma。通过选取郗山稀土矿和胡家庄稀土矿进行同位素研究, 郗山稀土矿方解石及矿体中  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  为 8.2‰~9.1‰,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  为 -7.5‰~-7.1‰, 成矿物质与碱性岩浆最初可能来源于上地幔; 胡家庄含稀土碳酸岩 C 同位素显示有幔源特征, O 同位素落入海相碳酸岩和幔源碳酸岩之间, 显示有海相碳酸岩特征, 因此推测, 方解石矿物经历过后期改造成为次生矿物, 为成矿热液与围岩进行水岩反应混合后的结果, 二者成矿物质来源具有幔源特征, 成矿物质来源相似。根据成矿系列理论, 在郗山稀土矿开展系统找矿工作, 以寻找中生代郗山碱性杂岩体为找矿目标, 提交特大型稀土矿床 1 处, 取得了重大找矿突破, 证实了鲁西地区具有较好的找矿前景。

**关键词:** 稀土; 成矿系列; 成矿物质来源; 新突破

中图分类号: P618.7 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.022302

## New Breakthroughs in Metallogenic Series Division and Prospecting of Rare Earth Deposits in Western Shandong Province

LAN Jun<sup>1)</sup>, ZHANG Peng<sup>1)</sup>, SUN Li<sup>2)</sup>, XING Nan<sup>1)\*</sup>, LI De-jian<sup>4)</sup>, YANG Yun-tao<sup>1)</sup>,  
LI Yi-xin<sup>3)</sup>, XIAO Ke-yan<sup>2)</sup>, XU Hong-yan<sup>1)</sup>, WANG Jian<sup>1)</sup>

1) The Fifth Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources,  
Academician Workstation of Shandong Province, Taian, Shandong 271000;

2) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,  
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) Guangxi Key Laboratory of Hidden Metal Mineral Exploration, Guilin, Guangxi 541004

4) Shandong Weishanhu Rare Earth Co., Ltd., Jining, Shandong 277600

**Abstract:** Western Shandong region is an important rare earth base in China. Four rare earth mines (deposits) have been found and evaluated; namely, Xishan Extra Large Rare Earth Mine in Weishan County, the Zaozhuang Xuecheng Guandi Temple rare earth mine, the medium Lanling Longbaoshan rare earth mine, and the Zibo-Laiwu rare earth mine. The metallogenic series of rare earth deposits related to Late Yanshanian tectonic magmatism are determined based on recent research. According to the tectonic and magmatic conditions on which

本文由山东省自然资源厅“山东省微山县郗山地区稀土矿深部及外围调查评价”(编号: 鲁勘字(2018)30 号)、山东地矿局基金项目“微山-枣庄地区稀土矿成矿作用及找矿方向研究”(编号: KC202104)和“济宁市郗山地区稀土矿成矿机理研究”(编号: KY202207)联合资助。

收稿日期: 2022-10-07; 改回日期: 2023-02-16; 网络首发日期: 2023-02-27。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 兰君, 男, 1986 年生。本科, 高级工程师。现从事稀土勘查科研工作。E-mail: lanjun56@126.com。

\*通讯作者: 邢楠, 男, 1986 年生。硕士, 高级工程师。现从事矿产勘查工作。E-mail: xingnan361@163.com。

the formation of rare earth deposits depends, the deposit series was formed in the Mesozoic era and continued through the Late Yanshanian period. It is preliminarily divided into a rare earth ore forming subseries: a metallogenic sub series related to tectonic magma and magmatic hydrothermal, with a metallogenic age of  $(110 \pm 4.2) - (134.9 \pm 1.8)$  Ma. Through an isotope study of Xishan rare earth ore and Hujiazhuang rare earth ore,  $^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  in the calcite and ore body of Xishan rare earth ore was determined to be 8.2‰–9.1‰,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  is  $-7.5\text{‰} - -7.1\text{‰}$ , and the ore-forming materials and alkaline magma may originate from the upper mantle. The C isotope of Hujiazhuang rare earth bearing carbonatite shows mantle source characteristics, and the O isotope falls between the marine carbonatite and the mantle carbonatite, showing the characteristics of marine carbonatite. Therefore, it is speculated that the calcite mineral has undergone a late transformation into a secondary mineral, as a result of the water rock reaction of the ore-forming hydrothermal solution and the wall rock. The source of the ore-forming materials of the two minerals has mantle source characteristics, and the source of the ore-forming materials is similar. In accordance with the metallogenic series theory, systematic prospecting work was conducted in the Xishan rare earth ore deposit with the goal of finding the Mesozoic Chishan alkaline complex. One super-large rare earth deposit was discovered, confirming that the western Shandong region has suitable prospecting potential.

**Key words:** rare earth; metallogenic series; source of ore-forming materials; new breakthroughs

稀土广泛应用于冶金、农业、工业等行业,是新材料制造的重要依托和关系尖端国防技术开发的关键性资源,被称为“万能之土”,在国民经济发展中具有不可替代的作用(王登红等, 2016; 郑国栋等, 2021)。鲁西地区是全国重要的稀土产地之一,鲁西稀土矿位于山东微山、枣庄、兰陵、淄博—莱芜地区(张鹏和兰君, 2020a; 张云峰等, 2022),分布有郯山特大型稀土矿床 1 处、龙宝山中大型稀土矿床 1 处、关帝庙矿点 1 处、莱芜—淄博矿点 60 余处,郯山矿目前为已探明的国内仅有的几个特大型矿床之一,2018 年,在郯山矿深部及外围发现细脉浸染型稀土矿石新类型(兰君, 2019; 张鹏和兰君, 2020a; 张云峰等, 2022),矿床规模得以大大提升。

浸染型矿石类型的发现,改变了以往该区稀土矿成矿的认知,本文通过对鲁西地区典型矿床的研究与综合对比,较全面地对矿床的地质特征(兰君, 2019)、成矿系列进行深入探讨,阐述了找矿勘查新突破,分析了找矿前景(张鹏和兰君, 2020a)。对鲁西地区的稀土找矿工作具有一定的指导意义(张鹏和兰君, 2020b; 张云峰等, 2022)。

## 1 区域成矿背景

鲁西稀土矿集区是我国重要的稀土矿资源基地(王登红等, 2016; 郑国栋等, 2021),鲁西地块由沂沭断裂带、丰沛断裂、聊城—兰考断裂、齐河—广饶断裂界定,该区成矿地质条件复杂多样,地层属柴达木—华北地层大区、华北地层区,鲁西地层分区,出露有前寒武纪变质地层和中新生代陆相沉积-火山地层。岩浆活动频繁,以早前寒武纪侵入岩为主,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(金振奎等, 1999; 赵国春等, 2002)。中生代燕山期岩浆活动相对强烈(张鹏和

兰君, 2020a; 张鹏等, 2022, 2023; 兰君等, 2023),集中分布于沂沭断裂带西侧、济南、微山、薛城、平邑、莱芜、博山、沂南、兰陵等地,多为岩株、岩床及岩脉组成的杂岩体,与稀土矿化关系极为密切。鲁西地区经历了漫长、多期的构造运动,构造形态极为复杂(朱日祥等, 2012, 2015; 吴福元等, 2008)。区内主要发育两种构造:韧性剪切带和脆性断裂,局部发育褶皱。韧性剪切带主要发育于新太古代泰山岩群及前寒武纪结晶基底中,断裂主要以沂沭断裂带为主体,以及在其西侧所形成的 NW、NWW 向一系列派生断裂,受燕山期活动的影响(曲平等, 2020; 徐聪等, 2021),在其上又叠加了 NE、NNE 向构造(图 1)。区内褶皱主要发育于泰山岩群,多以小型紧闭褶皱为主。此外,在古生代地层中局部形成一些开阔的向斜或背斜褶皱。断裂构造对郯山稀土矿、龙宝山稀土矿(于学峰等, 2010)、关帝庙稀土矿影响较大(邹安德等, 2018)。

## 2 成矿系列及典型矿床

根据陈毓川院士的成矿系列理论(程裕淇等, 1979, 1983; 陈毓川等, 2016, 2020; 秦锦华等, 2020),山东省属于华北陆块成矿省,鲁西稀土矿成矿系列可定为一个系列:与构造-岩浆作用有关的稀土矿床成矿系列(唐菊兴等, 2012; 郭娜欣等, 2015; 王登红等, 2022)。根据稀土矿形成依存的构造-岩浆条件,该矿床系列形成于整个中生代,贯穿于燕山晚期,初步分为一个稀土矿成矿亚系列:与构造-岩浆及岩浆热液有关的成矿亚系列(表 1)。

该成矿亚系列中的不同成因类型稀土矿床,由于岩浆化学成分不同,与其接触的围岩不同等系列环境的差异(叶庆同和傅旭杰, 1998; 杨富全和傅旭杰, 2000; 赵正等, 2022; 陈毓川等, 2022),各不同

成因类型的稀土矿床主元素及伴生元素具有不同的特征。选取郯山稀土矿和胡家庄稀土矿简介如下:

2.1 郯山稀土矿

(1)矿体特征

矿床分布于郯山一村至郯山三村一带, 平面上呈带状(图 2), 立体形态呈不规则的脉状或板状(兰君, 2019)。整体呈约 118°方向展布, 倾向 SW,

倾角 40°~ 60°。控制矿体沿走向最大长度 756.05 m, 沿倾向最大延伸 852.58 m。区内揭露矿体为两种类型: 含稀土石英重晶石碳酸岩脉型和细脉浸染型(图 2, 图 3a, c)。含稀土石英重晶石碳酸岩脉型矿体赋存于石英重晶石碳酸岩脉内, 细脉浸染型矿体主要分布于碱性杂岩体中(张鹏和兰君, 2020b; 张云峰等, 2022)。

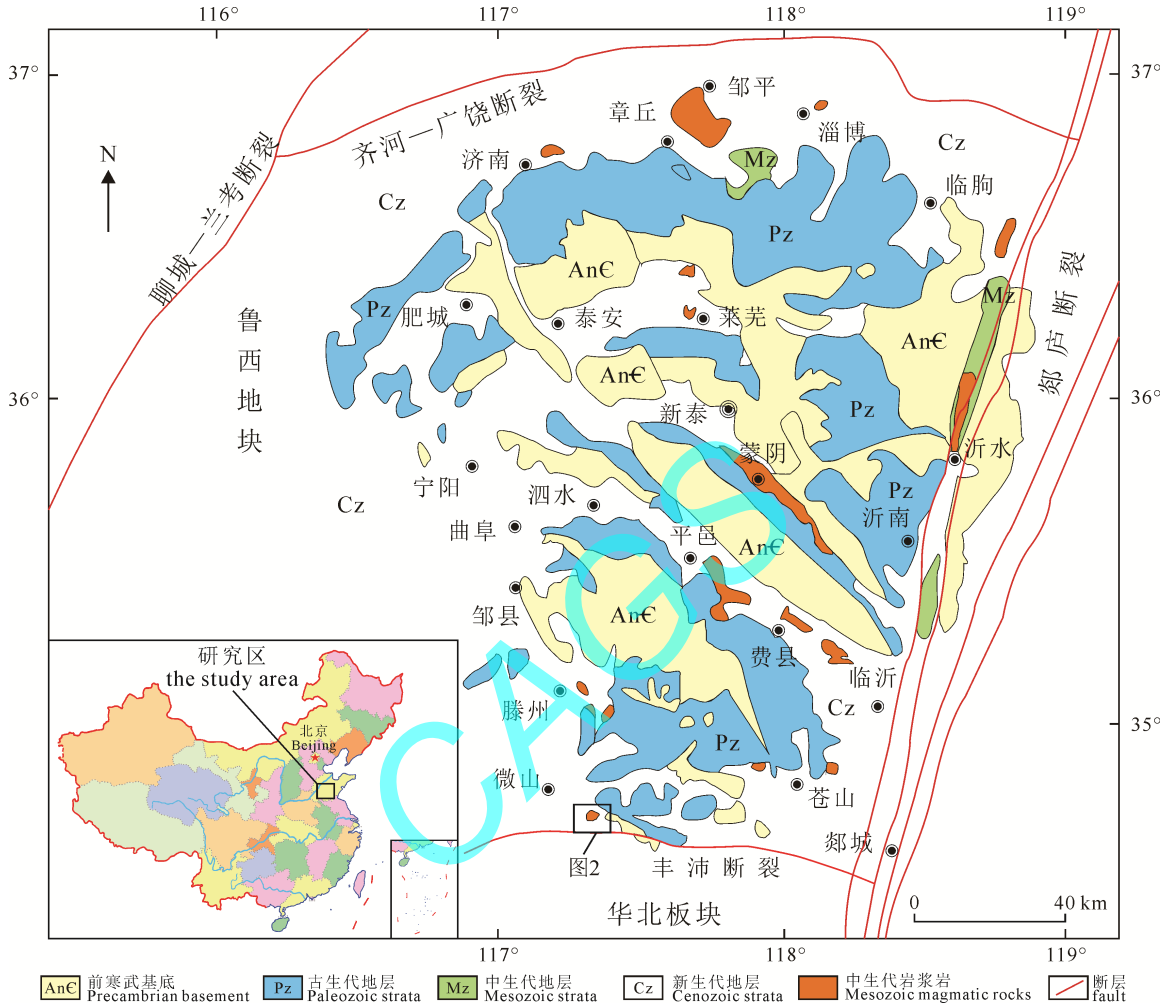


图 1 鲁西地区地质简图(据金振奎等, 1999 修改)  
Fig. 1 Regional geological map of Western Shandong (modified from JIN et al., 1999)

表 1 鲁西地区稀土矿床成矿系列  
Table 1 Metallogenic series of rare earth deposits in Western Shandong

时 代	成矿 系列	成矿 亚系列	成因类型	成矿元素		成矿时代 /Ma	大地 构造 位置	产出部位	容矿岩石	围岩	规模	代表性 矿床
				主要	次要							
燕山 晚期	与构造-岩浆作用有关的稀土矿床成矿系列	与构造-岩浆及岩热液有关的成矿亚系列	岩浆型	Ga、Th、Nb		119.5±1.7	鲁西隆起区鲁中隆起	含稀土石英重晶石碳酸盐脉、碱性杂岩体	碱性杂岩体	岩体	大型	郯山
			碱性岩-岩浆热液型	Th		110		含稀土石英重晶石碳酸盐脉、黑云母角闪石岩	黑云母角闪石岩	岩体	小型	薛城
			碱性岩-岩浆热液型	Au		(116.62±1.93)~ (107.34±2.32)		岩体外围及石英脉	正长斑岩、灰岩等	岩体、灰岩等	中型	龙宝山
			碳酸岩-岩浆热液型	Nb		122±4.2		碳酸岩体	碳酸岩	灰岩等	矿点	胡家庄
			碳酸岩-岩浆热液型			134.9±1.8		碳酸岩体及蛭石化含磷灰石云母岩体	碳酸岩及蛭石化含磷灰石云母岩	灰岩等	矿化点	石马

(2)岩相学特征与主量元素构成

组成岩石的矿物成分主要有方解石和少许重晶石、氟碳铈矿、白云母、金属矿物等, 粒径一般在0.2~1.5 mm之间, 个别颗粒可达5.00 mm左右, 在岩石中呈变斑晶, 构成斑状变晶结构。矿物之间往往紧密接触, 杂乱排列。氟碳铈矿, 多呈柱状、长柱状变晶, 少许呈细粒状变晶, 个别呈变斑晶, 呈聚集状或分散状分布于方解石间隙中或岩石微隙中(欧阳怀和刘琰, 2018), 杂乱排列。淡棕褐色、淡黄色。

样品 SiO<sub>2</sub> 含量 46.7%~55.4%, 属碱性岩类,

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO 含量 2.67%~5.48%, K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 含量 3.77%~7.87%, 属碱质不饱和岩石(表 2)。

矿石多呈半自形-它形粒状结构、自形粒状结构、块状和浸染状构造(兰君, 2019; 张鹏和兰君, 2020a; 张鹏等, 2022, 2023)。矿石矿物以氟碳铈矿为主(图 3b, d), 其次为氟碳钙铈矿, 另含碳酸铈钠矿、菱钙铈矿、硅铈矿、独居石、铈硅石、富铈烧绿石、钍石、黄铜矿、方铅矿、钼铅矿、闪锌矿、辉钼矿、水针铁矿和铅铁矾等(原显顺, 2019; 付帅, 2018)。脉石矿物主要为石英、重晶石、碳酸盐、

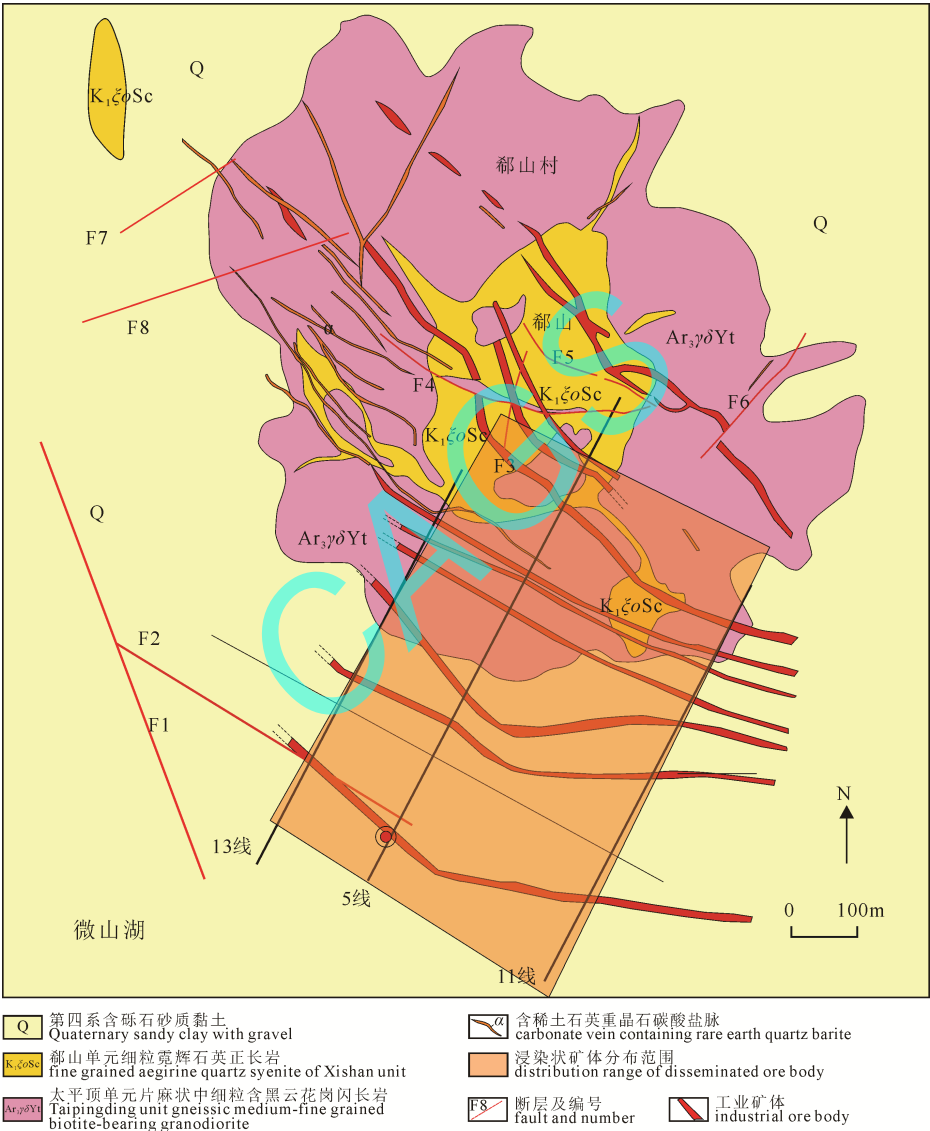
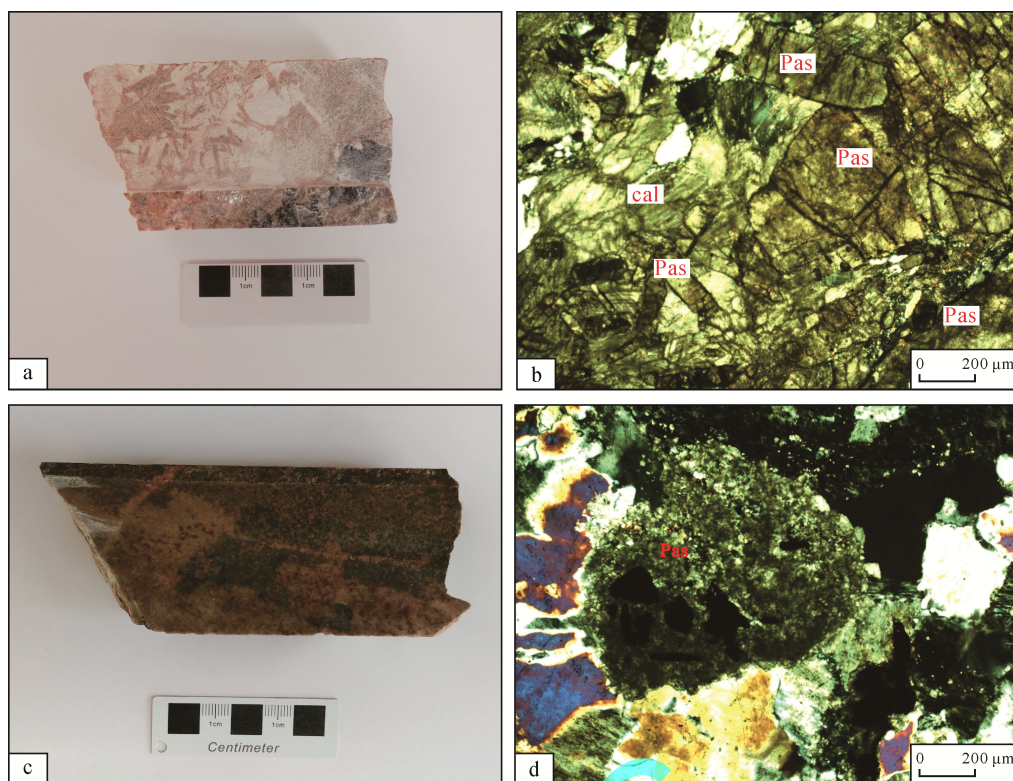


图 2 郗山地区地质简图  
Fig. 2 Regional geological map of the Xishan area

表 2 郗山稀土矿岩矿石全分析结果表/%  
Table 2 Total analysis results/% of Xishan rare earth ore rock

样品编号	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	备注
WSQH1	46.7	10.21	1.30	11.1	0.33	2.9	2.58	<0.01	0.20	0.20	3.04	2.74	脉型
WSQH3	55.4	8.24	0.47	10.2	0.11	1.7	1.47	<0.01	0.03	0.07	2.03	2.74	
WSQH5	55.3	5.25	0.51	11.6	0.20	2.7	2.34	<0.01	0.10	0.14	3.11	4.76	浸染型
WSQH6	47.6	9.86	0.62	8.0	0.14	1.6	1.07	<0.01	0.11	0.13	0.34	3.43	





a—含稀土石英重晶石碳酸岩脉; b—含稀土石英重晶石碳酸岩脉镜下照片(稀土矿物成板柱状); c—浸染型矿石; d—浸染型矿石镜下照片(稀土矿物成粒状); Pas—氟碳钙铈矿; cal—方解石。

a—carbonatite vein containing rare earth quartz barite; b—microscopic photos of quartz barite carbonatite veins containing rare earth (rare earth minerals are tabular); c—disseminated ore; d—microscopic picture of disseminated ore (rare earth minerals are granular); Pas—parisite; cal—calcite.

图 3 郗山含稀土石英重晶石碳酸岩脉及镜下照片、浸染型矿石及镜下照片

Fig. 3 Rare earth-bearing quartz barite carbonatite vein and microscopic photos, disseminated ore, and microscopic photos in Xishan

萤石、钛铁金红石、白云母、软硬锰矿、赤铁矿、蛋白石、玉髓、硫化物残余和钛铁金红石等(兰君, 2019; 张鹏和兰君, 2020b)。

### (3)矿化特征及共伴生矿物

矿体围岩为片麻状中粒花岗岩和石英正长岩; 蚀变为钠长石化、奥长石化、碱性(特别 Na)交代、碳酸盐化、重晶石化、萤石化、硅化、铅锌矿化、黄铜矿化、天青石化、黄铁矿化、硫化物化和稀土矿化等(付帅, 2018; 原显顺, 2019)。

主要稀土元素有: Ce、La、Nd、Pr、Sm、Eu、Er、Gd、Lu、Y 等, 另含 Ga、Th、U, 其他金属元素有 Cu、Mo、Pb 等。Pr 和 Nd 彼此伴随成正相关关系, La 的变化与 Nd、Pr 成负相关关系。Y 组稀土元素比较少见, Y 含量与  $\Sigma$ REE 呈负相关关系(兰君, 2019; 张鹏和兰君, 2020b)。

$\text{Nb}_2\text{O}_5$  含量多为 0.01%~0.02%, 可回收利用; Ga 含量 0.010%~0.088%, Ga 含量与  $\Sigma$ REE 呈正相关关系, 分布于工业矿体中, 具综合利用价值。

## 2.2 莱芜胡家庄稀土矿

胡家庄稀土矿位于莱芜北部胡家庄村北, 稀土矿体在平面图上呈三个长形薄层状矿体分布, 自东

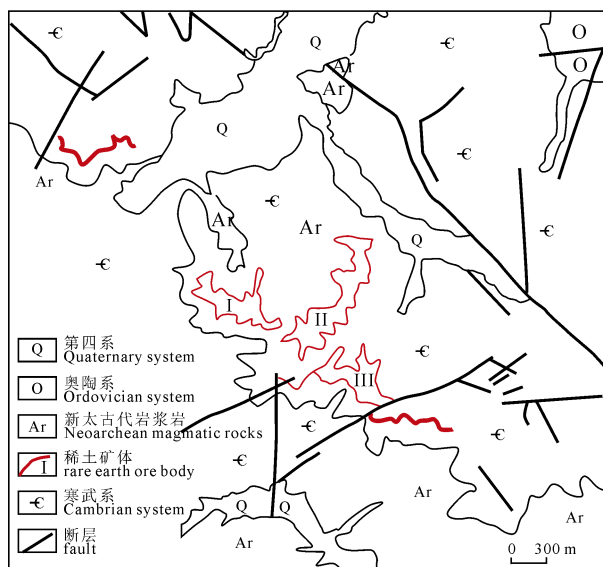


图 4 胡家庄地区地质略图(据王继芳等, 2021 修改)

Fig. 4 Regional geological map of the Hujiazhuang area(modified from WANG et al., 2021)

向西分别为 I、II、III 号矿体(图 4)。矿体呈西北、东南向展布, 长 800~1100 m, 宽 150~200 m, 倾向 NNE, 倾角  $5^\circ \sim 15^\circ$ , 矿体  $\text{TRE}_2\text{O}_3$  含量 0.95%~1.01%。矿石为灰白色-红棕色, 风化后为黄褐色。

围岩为泥质灰岩。蚀变为弱碳酸盐化、矽卡岩化和萤石矿化(刘敬杰等, 2019; 王继芳等, 2021)。自形、半自形粒状结构。构造以块状为主, 条带状次之。稀土矿物主要有氟碳铈矿、氟碳钙铈矿。脉石矿物成分主要有碳酸盐、石英、磁铁矿、磷灰石、黑云母等, 其次为褐铁矿、钾长石、重晶石、绿泥石、金云母及金属硫化物等(刘敬杰等, 2019; 王继芳等, 2021)。

矿石的化学成分: 主要为 CaO、MgO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、CO<sub>2</sub>, 其次为 REO、Al、Ba、Mn、Sr、Ti 等(表 3, 表 4), 有很少量的 Zr、Na、Nb、Cu、Pb、Ga 等元素。矿石中 TRE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 0.75%~1.67%, 平均 1%。除稀土元素外, 主要伴生 Zr、Nb、Pb 和 Ga 等元素, 经人工重砂分析, 含 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.008%、0.006%、0.001%, 可考虑综合利用。

2.3 成矿物质来源

选取郧山稀土矿和胡家庄稀土矿采取 C-O 同位

素开展测试, 郧山稀土矿样品取自方解石脉、氟碳铈矿脉、重晶石脉和碱性正长岩, 通过实验测试发现, 郧山稀土矿所有样品方解石碳氧同位素分布比较一致, 变化范围极小(李建康等, 2009; 蓝廷广等, 2011)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  为 8.2‰~9.1‰,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  为 -7.5‰~-7.1‰(表 5), 均落在幔源碳酸盐范围内(图 5), 成矿物质与碱性岩浆最初可能来源于上地幔(蓝廷广等, 2011; 梁雨薇等, 2017); 胡家庄稀土矿样品取自含稀土碳酸岩, 碳同位素显示有幔源特征, 氧同位素落入海相碳酸岩和幔源碳酸岩之间, 显示有海相碳酸岩特征, 因此推测, 方解石矿物经历过后期改造成为次生矿物, 为成矿热液与围岩进行水岩反应混合后的结果,  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$  值为 -4.42‰~-6.82‰(表 6), 均值: -5.83‰, 极差: 2.4‰。变化范围较窄, 表明硫化物来源单一(蓝廷广等, 2011), 可能来源于地壳中富 <sup>32</sup>S 的沉积物或大气降水下渗循环的地下热水。

表 3 胡家庄稀土矿岩石全分析结果表/%  
Table 3 Total analysis results /% of Hujiazhuang rare earth ore

样品编号	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
P3QH1	8.05	34.97	12.49	0.53	0.05	/	/	< 0.01	0.05	0.05	0.07	0.04
P4QH1	2.90	44.53	1.81	0.17	0.32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01

表 4 胡家庄稀土矿微量元素分析结果表/(×10<sup>-6</sup>)  
Table 4 Trace element analysis results /(×10<sup>-6</sup>) of Hujiazhuang rare earth ore

样品编号	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta
P4WL2	55.19	2.03	7.15	0.55	0.73	284.78	294.78	26.80	6 944.60	711.23	116.03	12 770.25	6.21	6.70
P4WL5	70.00	3.10	6.34	1.16	11.62	64.11	281.10	8.70	3 096.48	579.02	161.82	17 466.15	7.59	5.41
样品编号	W	Pb	Th	U	As	Sb	Se	Mo	Sn	F	Cl	Ag	Au	Hg
P4WL2	0.22	128.85	266.38	15.83	21.55	1.06	0.03	0.13	0.74	2 113.51	322.28	114.91	1.68	35.86
P4WL5	4.67	33.72	121.44	26.41	35.41	2.41	0.13	0.12	0.41	1 921.11	318.81	52.02	1.32	107.88

表 5 郧山、胡家庄稀土矿 C-O 同位素组成  
Table 5 C-O isotopic composition of Xishan and Hujiazhuang rare-earth deposits

样号	样品描述	测试样品	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	采样地点
XSTW1	方解石脉	方解石	8.2	-7.2	郧山
XSTW2	方解石脉	方解石	8.4	-7.1	
XSTW3	氟碳铈矿脉	方解石	8.4	-7.2	
XSTW4	氟碳铈矿脉	方解石	8.5	-7.3	
XSTW5	重晶石脉	方解石	8.7	-7.1	
XSTW6	重晶石脉	方解石	8.6	-7.1	
XSTW7	碱性正长岩	方解石	8.6	-7.2	
XSTW8	碱性正长岩	方解石	9.1	-7.5	
HJZTW-1	碳酸岩	方解石	21.60	-4.52	胡家庄
HJZTW-2	碳酸岩	方解石	21.16	-7.83	
HJZTW-3	碳酸岩	方解石	21.25	-5.16	
HJZTW-4	碳酸岩	方解石	20.78	-6.34	
HJZTW-5	碳酸岩	方解石	21.76	-5.61	

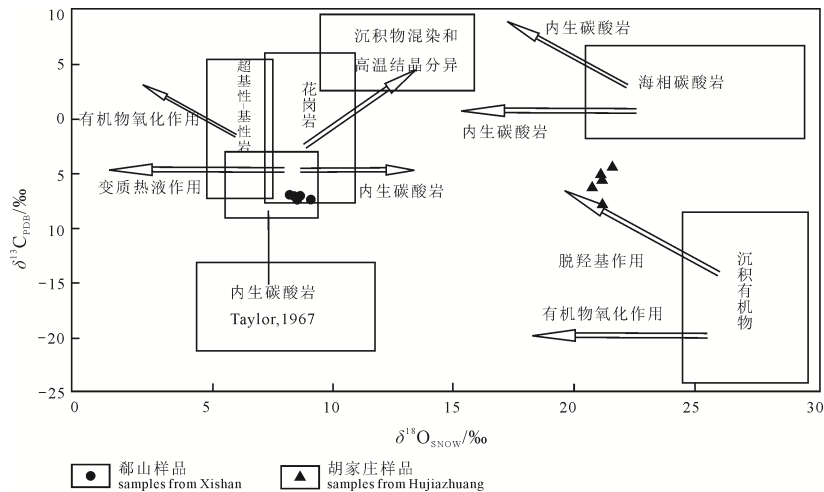


图 5 鲁西郯山、胡家庄稀土矿碳酸盐碳氧同位素分布图(底图据刘家军等, 2004)

Fig. 5 Carbon and oxygen isotope distribution of carbonate in Xishan and Hujiashuang rare earth mines in western Shandong (basemap from LIU et al., 2004)

表 6 胡家庄稀土矿 S 同位素组成

Table 6 S isotopic composition of the Hujiashuang rare-earth deposit

序号	样品编号	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$	$\pm\text{‰}$
1	DKHJZ-1	黄铁矿	-4.42	0.08
2	DKHJZ-2	黄铁矿	-4.33	0.09
3	DKHJZ-6	黄铁矿	-5.04	0.06
4	DKHJZ-7	黄铁矿	-5.34	0.07
5	DKHJZ-8	黄铁矿	-5.83	0.03
6	DKHJZ-9	黄铁矿	-6.25	0.04
7	DKHJZ-12	黄铁矿	-6.62	0.04
8	DKHJZ-14	黄铁矿	-6.71	0.07
9	DKHJZ-19	黄铁矿	-6.91	0.04
10	DKHJZ-26	黄铁矿	-6.82	0.02
平均			-5.83	

3 找矿新进展

自 20 世纪 60 年代郯山稀土矿被发现以来, 截至 2017 年, 累计提交稀土氧化物接近  $n$  万 t, 为中型稀土矿床, 近几年在山东省省级地质勘查项目 (2018—2020 年) 的支持下, 山东省第五地质矿产勘查院组建了 3 稀矿产项目组, 在成矿系列理论和岩体控矿理论的指导下, 取得了一系列找矿新突破, 通过工作发现, 矿床成因类型为晚期岩浆型稀土矿床, 圈定了矿体 44 条(图 6), 提交了特大型稀土矿床 1 处, 细脉浸染型矿石类型的发现, 极大提高了资源量规模, 通过工程控制含稀土石英重晶石碳酸岩脉型矿体真厚度 1.10~7.62 m, 平均 3.35 m, 矿体  $\text{TRE}_2\text{O}_3$  含量 1.56%~7.46%, 细脉浸染型矿体真厚度 1.00~61.83 m, 平均 10.37 m, 矿体  $\text{TRE}_2\text{O}_3$  含量 0.50%~4.37%。两种矿石均有较高的开发利用价值, 4 年时间累计提交稀土氧化物工业矿逾  $n$  万 t(推

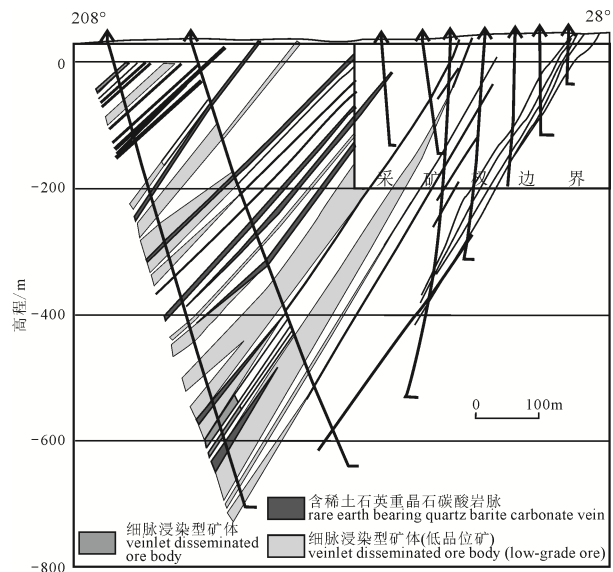
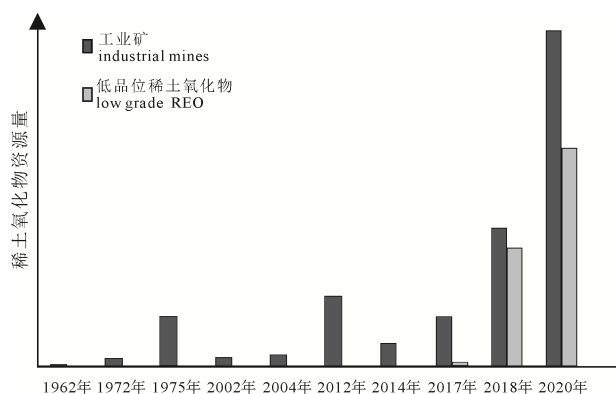


图 6 郯山地区第 5 勘查线剖面

Fig. 6 Section of the 5<sup>th</sup> exploration line in Xishan area





图中 2018 年、2020 年资源量由山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队提交。

Resource quantity of 2018, 2020 was submitted by the Fifth Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources.

图 7 郯山稀土矿不同时期提交稀土氧化物资源量柱形图

Fig. 7 Column chart of rare earth oxide resources submitted by the Xishan rare earth mine in different periods

断资源量), 低品位矿逾  $n$  万 t(推断资源量), 探获资源量是以往资源量的 5 倍(图 7), 取得了找矿重大突破。

## 4 结论

(1)通过近几年的勘查、科研工作发现, 鲁西地区稀土矿为中生代幔源成因(胡家庄稀土矿具有海相碳酸岩特征), 深部矿体赋存规模大。

(2)浸染型矿体的发现大大提高了郯山稀土矿床的储量, 使得郯山稀土矿实现了找矿新进展, 并跃升为特大型稀土矿。

(3)郯山稀土矿矿体与鲁西碳酸岩、云母岩型稀土矿体成矿物质来源高度一致, 从深度和广度而言, 鲁西地区具有较好的稀土矿找矿前景。

## Acknowledgements:

This study was supported by Department of Natural Resources of Shandong Province (No. LUKAN(2018)30), and Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (Nos. KC202104 and KY202207).

## 参考文献:

- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2016. 矿床成矿系列——五论矿床的成矿系列问题[J]. 地球学报, 37(5): 519-527.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2020. 论地球系统四维成矿及矿床学研究趋向——七论矿床的成矿系列[J]. 矿床地质, 39(5): 745-753.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2022. 八论矿床的成矿系列[J]. 地质学报, 96(1): 123-130.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 宋天锐. 1983. 再论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, (6): 1-64.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣. 1979. 初论矿床的成矿系列问题[J].

- 中国地质科学院院报, 1(1): 32-58.
- 付帅. 2018. 山东省微山县郯山稀土矿地质特征与成因分析[J]. 世界有色金属, (18): 253-254.
- 郭娜欣, 陈毓川, 赵正, 吕晓强, 刘珍, 陈郑辉, 曾载淋, 李江东, 张凤荣. 2015. 南岭科学钻中与两种岩浆岩有关的矿床成矿系列——年代学、地球化学、Hf 同位素证据[J]. 地球学报, 36(6): 742-754.
- 金振奎, 刘泽容, 石占中. 1999. 鲁西地区断裂构造类型及其形成机制[J]. 石油大学学报(自然科学版), 23(5): 1-5.
- 兰君, 付瑞鑫, 张鹏, 邢楠, 李得建, 王健, 徐洪岩. 2023. 鲁西郯山稀土矿石英正长岩元素地球化学特征及其指示意义[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 62(3): 47-56.
- 兰君. 2019. 山东省微山郯山地区稀土矿成矿规律探讨[J]. 山东国土资源, 35(6): 39-43.
- 蓝廷广, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 王永. 2011. 山东微山稀土矿床成因: 来自云母 Rb-Sr 年龄, 激光 Nd 同位素及流体包裹体的证据[J]. 地球化学, 40(5): 428-442.
- 李建康, 袁忠信, 白鸽, 陈毓川, 王登红, 应立娟, 张建. 2009. 山东微山稀土矿床成矿流体的演化及对成矿的制约[J]. 矿物岩石, 29(3): 60-68.
- 梁雨薇, 赖勇, 胡弘, 张丰. 2017. 山东省微山稀土矿正长岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 53(4): 652-666.
- 刘家军, 何明勤, 李志明, 刘玉平, 李朝阳, 张乾, 杨伟光, 杨爱平. 2004. 云南白秧坪银铜多金属矿集区同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 23(1): 1-10.
- 刘敬杰, 张鹏, 兰君, 牛金, 邢楠. 2019. 山东莱芜胡家庄地区稀土矿流体包裹体特征及成矿条件[J]. 山东国土资源, 35(1): 14-18.
- 欧阳怀, 刘琰. 2018. 四川冕宁木落寨稀土矿床稀土矿化与围岩特征[J]. 地球学报, 39(3): 329-341.
- 秦锦华, 王登红, 陈毓川, 赵如意, 刘善宝, 江彪. 2020. 矿田尺度成矿规律与成矿系列研究——以湖南水口山为例[J]. 地质学报, 94(1): 255-269.
- 曲平, 吕杰, 郭震, 于勇, 陈永顺. 2020. 山东地区地壳及上地幔结构研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 56(4): 649-658.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应立娟. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393-410.
- 王登红, 黄凡, 王岩, 徐志刚, 陈毓川, 董连慧. 2022. 区域矿床成矿谱系的概念、内涵及其应用[J]. 矿床地质, 41(5): 879-892.
- 王登红, 王瑞江, 孙艳, 李建康, 赵芝, 赵汀, 屈文俊, 付小方, 江善元, 黄华谷, 冯文杰, 徐平, 李胜苗, 黄新鹏, 周辉, 朱永新, 涂其军, 李新仁, 方一平, 周园园. 2016. 我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J]. 地球学报, 37(5): 569-580.
- 王继芳, 徐然, 安茂国, 陆林祥, 唐洪敏, 谢丽丽, 黄坤朋. 2021. 鲁西胡家庄-西石马地区稀土矿成矿地质特征及找矿前景分析[J]. 山东国土资源, 37(7): 10-18.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145-1174.
- 徐聪, 李理, 符武才. 2021. 鲁西地块中、新生界裂缝发育特征及构造应力场分析[J]. 地质科学, 56(3): 829-844.



- 杨富全, 傅旭杰. 2000. 新疆南天山成矿带矿床成矿系列[J]. 地球学报, 21(1): 38-43.
- 叶庆同, 傅旭杰. 1998. 新疆阿尔泰山带矿床成矿系列[J]. 地球学报, 19(1): 31-39.
- 于学峰, 唐好生, 韩作振, 李长有. 2010. 山东祁山-龙宝山地区与碱性岩有关的稀土矿床地质特征及成因[J]. 地质学报, 84(3): 407-417.
- 原显顺. 2019. 山东微山稀土矿床的稀土矿物学研究[J]. 矿产勘查, 10(9): 2229-2242.
- 张鹏, 兰君. 2020a. 山东省稀土矿产资源特征及找矿方向研究初探[J]. 山东国土资源, 36(12): 13-18.
- 张鹏, 兰君. 2020b. 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, 36(3): 15-19.
- 张鹏, 刘珊珊, 兰君, 李衣鑫, 邢楠, 刘敬杰, 刘袁坤, 康志强, 杨锋. 2022. 山东省微山县祁山稀土矿床成矿年代学新进展[J/OL]. 地质科技通报: 1-11[2023-04-28]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.2022.0265>.
- 张鹏, 刘珊珊, 兰君, 李衣鑫, 邢楠, 杨云涛, 刘敬杰, 刘袁坤, 康志强, 杨锋. 2023. 山东省微山县祁山稀土矿同位素年代学、岩石地球化学及其成因[J/OL]. 桂林理工大学学报: 1-16[2023-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.N.20230224.1417.002.html>.
- 张云峰, 张鹏, 刘敬杰, 兰君, 邢楠. 2022. 山东省微山县祁山内生型轻稀土矿找矿及研究新进展[J]. 山东国土资源, 38(1): 19-25.
- 赵国春, 孙敏, WILDE S A. 2002. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. 中国科学 D 辑, 32(7): 538-549.
- 赵正, 陈毓川, 王登红, 李建康, 刘善宝, 陈振宇, 郭春丽, 王平安. 2022. 华南中生代动力体制转换与钨锡铍铌钽稀土矿床成矿系列的叠加演化[J]. 岩石学报, 38(2): 301-322.
- 郑国栋, 王琨, 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 龙涛, 董延涛, 倪晋鹏. 2021. 世界稀土产业格局变化与中国稀土产业面临的问题[J]. 地球学报, 42(2): 265-272.
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿床[J]. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1153-1168.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1135-1159.
- 邹安德, 赵法强, 宋娟娟, 郑晓阳. 2018. 山东枣庄薛城地区稀土矿成矿规律研究及找矿预测[J]. 山东国土资源, 34(2): 1-7.
1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences, (6): 1-64(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming. 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences, 1(1): 32-58(in Chinese with English abstract).
- FU Shuai. 2018. Geological characteristics and genetic analysis of the Xi Shan rare earth deposit in Weishan County, Shandong Province[J]. World Nonferrous Metals, (18): 253-254(in Chinese with English abstract).
- GUO Na-xin, CHEN Yu-chuan, ZHAO Zheng, LÜ Xiao-qiang, LIU Zhen, CHEN Zheng-hui, ZENG Zai-lin, LI Jiang-dong, ZHANG Feng-rong. 2015. Metallogenic series related to two types of granitoid exposed in the Nanling scientific drilling hole: Evidence from geochronology, geochemistry and Hf isotope[J]. Acta Geoscientia Sinica, 36(6): 742-754(in Chinese with English abstract).
- JIN Zhen-kui, LIU Ze-rong, SHI Zhan-zhong. 1999. Distribution patterns and formation mechanism of faults in the West Shandong Province[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 23(5): 1-5(in Chinese with English abstract).
- LAN Jun. 2019. Study on metallogenic regularities of rare earth deposit in Xishan area of Weishan County in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 35(6): 39-43(in Chinese with English abstract).
- LAN Ting-guang, FAN Hong-rui, HU Fang-fang, YANG Kui-feng, WANG Yong. 2011. Genesis of the Weishan REE deposit, Shandong Province: Evidences from Rb-Sr isochron age, LA-MC-ICPMS Nd isotopic compositions and fluid inclusions[J]. Geochimica, 40(5): 428-442(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-kang, YUAN Zhong-xin, BAI Ge, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, YING Li-juan, ZHANG Jian. 2009. Ore-forming fluid evolution and its controlling to REE (Ag) mineralizing in the Weishan deposit, Shandong[J]. Mineralogy and Petrology, 29(3): 60-68(in Chinese with English abstract).
- LIANG Yu-wei, LAI Yong, HU Hong, ZHANG Feng. 2017. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics study of syenite from Weishan REE deposit, western Shandong[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 53(4): 652-666(in Chinese with English abstract).
- LIU Jia-jun, HE Ming-qin, LI Zhi-ming, LIU Yu-ping, LI Chao-yang, ZHANG Qian, YANG Wei-guang, YANG Ai-ping. 2004. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping basin of Yunnan Province and its significance[J]. Mineral Deposits, 23(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- LIU Jing-jie, ZHANG Peng, LAN Jun, NIU Jin, XING Nan. 2019. Fluid inclusions characteristics of rare earth deposit and metallogenic conditions in Hujiazhuang area in Laiwu City of Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 35(1):

## References:

- 14-18(in Chinese with English abstract).
- OUYANG Huai, LIU Yan. 2018. REE mineralization and characteristics of wall rocks in the Muluoizhai REE deposit, Mianning County, Sichuan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(3): 329-341(in Chinese with English abstract).
- QIN Jin-hua, WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, ZHAO Ru-yi, LIU Shan-bao, JIANG Biao. 2020. Research on metallogenic regularity and metallogenetic series in ore fields-a case study from the Shuikoushan ore field, Hunan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(1): 255-269(in Chinese with English abstract).
- QU Ping, LÜ Jie, GUO Zhen, YU Yong, CHEN Yong-shun. 2020. Study on crust and upper mantle structure in Shandong area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 56(4): 649-658(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, DOR Ji, LIU Hong-fei, LANG Xing-hai, ZHANG Jin-shu, ZHENG Wen-bao, YING Li-juan. 2012. Minerogenic series of ore deposits in the east part of the Gangdise metallogenetic belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, HUANG Fan, WANG Yan, XU Zhi-gang, CHEN Yu-chuan, DONG Lian-hui. 2022. Metallogenetic pedigree of regional mineral deposits: Concept, connotation and application[J]. *Mineral Deposits*, 41(5): 879-892(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, WANG Rui-jiang, SUN Yan, LI Jian-kang, ZHAO Zhi, ZHAO Ting, QU Wen-jun, FU Xiao-fang, JIANG Shan-yuan, HUANG Hua-gu, FENG Wen-jie, XU Ping, LI Sheng-miao, HUANG Xin-peng, ZHOU Hui, ZHU Yong-xin, TU Qi-jun, LI Xin-ren, FANG Yi-ping, ZHOU Yuan-yuan. 2016. A review of achievements in the three-type rare mineral resources(rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(5): 569-580(in Chinese with English abstract).
- WANG Ji-fang, XU Ran, AN Mao-guo, LU Lin-xiang, TANG Hong-min, XIE Li-li, HUANG Kun-peng. 2021. Metallogenetic geological characteristics and prospecting prospects of rare earth elements deposits in Hujiazhuang-Xishima area in western Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 37(7): 10-18(in Chinese with English abstract).
- WU Fu-yuan, XU Yi-gang, GAO Shan, ZHENG Jian-ping. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145-1174(in Chinese with English abstract).
- XU Cong, LI Li, FU Wu-cai. 2021. Development characteristics of fractures in the Mesozoic and Cenozoic and structure stress field analysis of the Luxi block[J]. *Chinese Journal of Geology*, 56(3): 829-844(in Chinese with English abstract).
- YANG Fu-quan, FU Xu-jie. 2000. Metallogenetic series of ore deposits in the South Tianshan Mountain metallogenetic belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 21(1): 38-43(in Chinese with English abstract).
- YE Qing-tong, FU Xu-jie. 1998. Metallogenetic series of ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang, China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 19(1): 31-39(in Chinese with English abstract).
- YU Xue-feng, TANG Hao-sheng, HAN Zuo-zhen, LI Chang-you. 2010. Geological characteristics and origin of rare earth elements deposits related with alkaline rock in the Chishan-Longbaoshan area, Shandong Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(3): 407-417(in Chinese with English abstract).
- YUAN Xian-shun. 2019. Rare earth mineralogy study of Weishan rare earth deposit in Shandong Province[J]. *Mineral Exploration*, 10(9): 2229-2242(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Peng, LAN Jun. 2020. Metallogenetic model and genesis of rare earth deposits in western Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 36(3): 15-19(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Peng, LAN Jun. 2020. Study on characteristics of rare earth resources and the prospecting direction in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 36(12): 13-18(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yun-feng, ZHANG Peng, LIU Jing-jie, LAN Jun, XING Nan. 2022. New research progress and prospecting of Chishan endogenetic light rare earth deposit in Weishan County in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 38(1): 19-25(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Guo-chun, SUN Min, WILDE S A. 2002. Characteristics of basement tectonic units of the North China Craton and early Proterozoic amalgamation[J]. *Science in China Series D*, 32(7): 538-549(in Chinese).
- ZHAO Zheng, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, LI Jian-kang, LIU Shan-bao, CHEN Zhen-yu, GUO Chun-li, WANG Ping-an. 2022. Transformation of Mesozoic dynamic systems and superposition of metallogenetic series of W-Sn-Li-Nb-Ta-REE mineral deposits in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(2): 301-322(in Chinese with English abstract).
- ZHU Ri-xiang, FAN Hong-rui, LI Jian-wei, MENG Qing-ren, LI Sheng-rong, ZENG Qing-dong. 2015. Decratonic gold deposits[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 45(8): 1153-1168(in Chinese).
- ZHU Ri-xiang, XU Yi-gang, ZHU Guang, ZHANG Hong-fu, XIA Qun-ke, ZHENG Tian-yu. 2012. Destruction of the North China Craton[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 42(8): 1135-1159(in Chinese).
- ZHENG Guo-dong, WANG Kun, CHEN Qi-shen, ZHANG Yan-fei, XING Jia-yun, LONG Tao, DONG Yan-tao, NI Jin-peng. 2021. The change of world rare earth industrial structure and the problems faced by China's rare earth industry[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 265-272(in Chinese with English abstract).
- ZOU An-de, ZHAO Fa-qiang, SONG Juan-juan, ZHENG Xiao-yang. 2018. Study on metallogenetic regularity and prospecting prediction of rare earth deposit in Xuecheng region of Zaozhuang City in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(2): 1-7(in Chinese with English abstract).