

山东铁矿成矿规律及潜力分析

郝兴中¹⁾, 肖克炎^{2)*}, 王巧云¹⁾, 朱学强¹⁾,
李英平¹⁾, 智云宝¹⁾, 张 文¹⁾, 张志刚¹⁾,
彭观峰¹⁾, 刘 芳¹⁾, 刘彬彬¹⁾

1)山东省地质调查院, 山东济南 250014;

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

摘 要: 山东省地处中国东部, 经历了漫长地质演化历史, 分为鲁西和鲁东 2 个主要地块, 地质矿产具有各自鲜明的特征; 其中区内铁矿成矿地质条件优越, 成因类型多样, 矿床广泛分布, 资源储量丰富, 是全国重要的铁矿开发基地。本次研究旨在通过对全省地质矿产资料进行总结, 从地层赋矿、构造控矿、岩浆岩成矿和物探异常示矿等方面对全省铁矿成矿规律进行分析, 进一步对全省铁矿资源潜力进行研究。研究表明全省铁矿类型共分苍峰式、莱芜市、莲子汪式、朱崖式等共 14 个矿床式; 铁矿成矿规律研究表明, 各铁矿类型受到地质构造演化控矿、地层控矿、岩体控矿、构造控矿等控制程度不同; 如地层控矿方面尤以沉积变质型、化学沉积型较为突出, 岩体控矿方面尤以岩浆型铁矿最为显著, 而接触交代型铁矿则是地层控矿、岩体控矿、构造控矿联合作用的结果。随着深部找矿工作的持续推进, 认真总结物探异常示矿规律是今后勘查工作的重点, 低缓磁异常区的勘查是取得重大进展的关键。通过对全区铁矿的时空分布特征对比分析和成矿规律研究, 划分了全省铁矿成矿系列, 并总结了综合找矿预测模型; 构建了研究区铁矿综合勘查技术体系。此次研究共圈定了苍峰铁矿远景区、莱芜铁矿远景区、淄河铁矿远景区和莱阳西铁矿远景区等 36 处; 其中沉积变质型铁矿共 15 处, 接触交代型铁矿共 9 处, 岩浆热液型铁矿共 4 处, 岩浆型铁矿共 8 处; 在上述 36 处远景区中, A 类远景区共 18 处, B 类远景区共 13 处, C 类远景区共 5 处, 在今后各个铁矿类型勘查过程中, 沉积变质型铁矿和接触交代型铁矿是今后勘查工作的重点。本次研究为今后全省铁矿找矿工作提供了部署依据和勘查方向。

关键词: 山东省; 铁矿; 控矿要素; 成矿规律; 成矿系列; 找矿远景区

中图分类号: P612 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.012902

Metallogenic Regularity and Potential Analysis of Iron Ore in Shandong Province

HAO Xing-zhong¹⁾, XIAO Ke-yan^{2)*}, WANG Qiao-yun¹⁾, ZHU Xue-qiang¹⁾,
LI Ying-ping¹⁾, ZHI Yun-bao¹⁾, ZHANG Wen¹⁾, ZHANG Zhi-gang¹⁾,
PENG Guan-feng¹⁾, LIU Fang¹⁾, LIU Bin-bin¹⁾

1) Shandong Institute of Geological Survey, Jinan, Shandong 250014;

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

Abstract: Shandong Province is located in the east of China and has experienced a long history of geological evolution. It is divided into two main blocks of western Shandong and eastern Shandong. The geology and

本文由山东省自然科学基金项目(编号: ZR2020MD033)、中国地质调查局“全国重要矿集区找矿预测”项目(编号: DD2016005223)和“重要锡、锰等矿集区矿产地质调查”(编号: DD20190166)、山东省矿产资源国情调查(编号: 鲁矿保[2020]1 号)联合资助。

收稿日期: 2022-10-09; 改回日期: 2023-01-16; 网络首发日期: 2023-01-31。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 郝兴中, 男, 1980 年生。博士, 正高级工程师。主要从事矿产资源评价、地球物理应用、成矿规律研究与预测工作。

E-mail: 57820696@qq.com。

*通讯作者: 肖克炎, 男, 1963 年生。博士, 研究员。主要从事矿产资源定量预测与评价。E-mail: kyanxiao@sohu.com。

mineral resources have their own distinct characteristics. Among these, the iron ore-forming geological conditions in the area are superior, the genetic types are diverse, the deposits are widely distributed, and the resources reserves are abundant. It is an important iron ore development base in China. The purpose of this study is to summarize the geological and mineral data of the province, analyze the iron metallogenic regularity of the province from the aspects of stratigraphic ore-hosting, structural ore-controlling, magmatic ore-forming and geophysical anomaly prospecting, and further study the iron ore resource potential of the province. This study found that the iron ore types in the province are divided into 14 ore deposit types, including Cangyi type, Laiwu type, Lianziwang type, and Zhuya type, etc. The study on the metallogenic regularity of iron ore showed that each type of iron ore is controlled by geological structure evolution, strata, magmatic rock and structure; For example, in terms of strata ore-controlling, sedimentary metamorphic type and chemical sedimentary type are more prominent; in terms of magmatic rock ore-controlling, magmatic type iron ore is the most prominent; while contact metasomatic type iron ore is the result of the combined ore-controlling of strata, magmatic rock and structure. With the continuous advancement of deep prospecting, the focus of future exploration work is to summarize geophysical anomalies prospecting carefully, and the exploration of low slow magnetic anomaly areas is the key to making great progress. Based on the comparative analysis of the temporal and spatial distribution characteristics of iron ore in the whole region and the study of metallogenic regularity, the metallogenic series of iron ore in the whole province are divided, and the comprehensive prospecting prediction model was summarized. The study established a comprehensive iron ore exploration technology system in the study area. The study has delineated 36 iron ore prospecting areas, including Cangyi iron ore prospecting area, Laiwu iron ore prospecting area, Zihe iron ore prospecting area and Laiyang West iron ore prospecting area; Among them, there are 15 sedimentary metamorphic type iron ores, 9 contact metasomatic type iron ores, 4 magmatic hydrothermal type iron ores and 8 magmatic type iron ores. There are 18 class A prospecting areas, 13 class B prospecting areas and 5 class C prospecting areas in the 36 iron ore prospecting area above. In the future exploration of various iron ore types, sedimentary metamorphic iron ore and contact metasomatic iron ore are the focus of future exploration. This study provides the deployment basis and exploration direction for the future iron ore prospecting work in the province.

Key words: Shandong Province; iron ore; ore-controlling elements; metallogenic regularity; minerogenetic series; prospecting prospect

山东省是我国的矿产大省, 其中铁矿是全省的支柱型矿种之一, 铁矿成矿地质条件优越, 铁矿床(点)广泛发育(李厚民等, 2012a; 郝兴中, 2014)。经地质工作者长期艰辛探索和刻苦钻研; 截至目前, 除东营和滨州辖区外的其他 14 个地市均发现了类型规模不同的铁矿资源, 主要分布于临沂、济南、淄博、泰安、潍坊、烟台、枣庄、济宁等市。全省已发现的铁矿成矿类型多样, 有沉积变质型、接触交代型、岩浆型、岩浆热液型、化学沉积型等, 其中苍峰铁矿带、东平—汶上铁矿带、韩旺铁矿带、济南城区铁矿区、莱芜铁矿区、金岭铁矿区、昌邑—莱州铁矿带等多个大型铁矿带(区)勘查程度较高; 各个类型铁矿床的规模和储量差异较大, 其中以沉积变质型铁矿和接触交代型铁矿最为重要, 具有极高的科研及勘查价值(曾广湘等, 1998; 孔庆友等, 2006; 郝兴中等, 2014; 李洪奎和郝兴中, 2016)。2007—2010 年, 山东省地质调查院通过开展山东省铁矿资源潜力评价工作, 对全省铁矿进行了较为系统地研究, 极大地提升了全省铁矿成矿规律和找矿预测水平。2010 年以来, 全省铁矿勘查工作取得了重大找矿进展, 已有矿区深部及外围取得了良好找

矿效果, 极大地延续了已有矿山的服役年限, 同时在新区找矿取得了较大突破, 如德州齐河—禹城地区、莱芜三岔河地区、单县龙王庙地区、东阿单庄地区等发现了沉积变质型和接触交代型铁矿床(郝兴中, 2014; 张增奇等, 2016; 金子梁, 2017; 马明和高继雷, 2018; 段壮, 2019; 安茂国, 2019); 与此同时, 全省铁矿科研工作也取得了长足的进步, 全省于 2019 年底完成了《中国矿产地质志·山东卷·铁钛矿产》编著工作, 对全省铁矿资源进行了重新梳理; 2008—2022 年, 山东省地质调查院在全省开展了十余个铁矿调查评价项目并取得了大量勘查和科研成果, 为本次研究奠定了资料基础。近年来铁矿石消费(王安建和高芯蕊, 2020)和价格持续高位运行, 对外依存度长期居高不下(谢承祥等, 2009; 马吉宇, 2017; 张艳飞等, 2021; 贾逸卿等, 2021), 因此开展铁矿成矿规律及潜力预测研究具有重要意义。本文在充分收集以往勘查资料和综合分析科研成果的基础上, 系统分析全省地质特征、物探异常和矿产特征等相关要素, 通过对全省各个类型铁矿进行成矿规律研究, 进而对其铁矿勘查潜力进行分析, 以期今后全省铁矿勘查工作提供依据和方向。

1 成矿地质背景

山东省位于中国中东部, 全省大地构造位置处于华北板块东南缘和泰祁昆造山系的东部, 位于华北板块、秦岭—大别—苏鲁造山带 2 个 I 级构造单元中, 以及华北坳陷区、鲁西隆起区、胶辽隆起区、胶南—威海隆起区、苏北隆起区共 5 个 II 级构造单元和 11 个 III 级构造单元(表 1, 图 1)。

全省地质构造演化复杂; 其中沂沭断裂带以 NNE 向沿山东中部贯穿全省, 将之分为鲁西、鲁东两个地质构造特征迥异的构造单元(李洪奎和郝兴中, 2016), 研究区内大型断裂发育; 各个构造单元在地层、构造、岩浆活动和成矿作用方面各具特点。

2 矿床类型特征

本次研究根据矿床成因类型、矿床时空分布特点等因素对全省铁矿矿床类型进行分类描述。

2.1 矿产成因特征

据《中国矿产地质志矿床(成因/工业)类型划分方案》(2015), 全省铁矿可划分为 5 种矿床成因类型, 即受变质型、接触交代型、岩浆型、岩浆热液型、化学沉积型矿床; 同时进一步将上述 5 种矿床成因

类型划分为 7 种亚类, 即将接触交代型分为与中基性侵入岩有关的接触交代型矿床和与中酸性侵入岩有关的接触交代型矿床 2 个亚类; 岩浆热液型划分为中高温岩浆热液型和中低温岩浆热液型 2 个亚类, 全省共分 14 个矿床式(表 2)。

2.2 铁矿床时空分布特征

根据前文中全省铁矿床类型分析, 将全省主要矿床的时空分布特征论述如下:

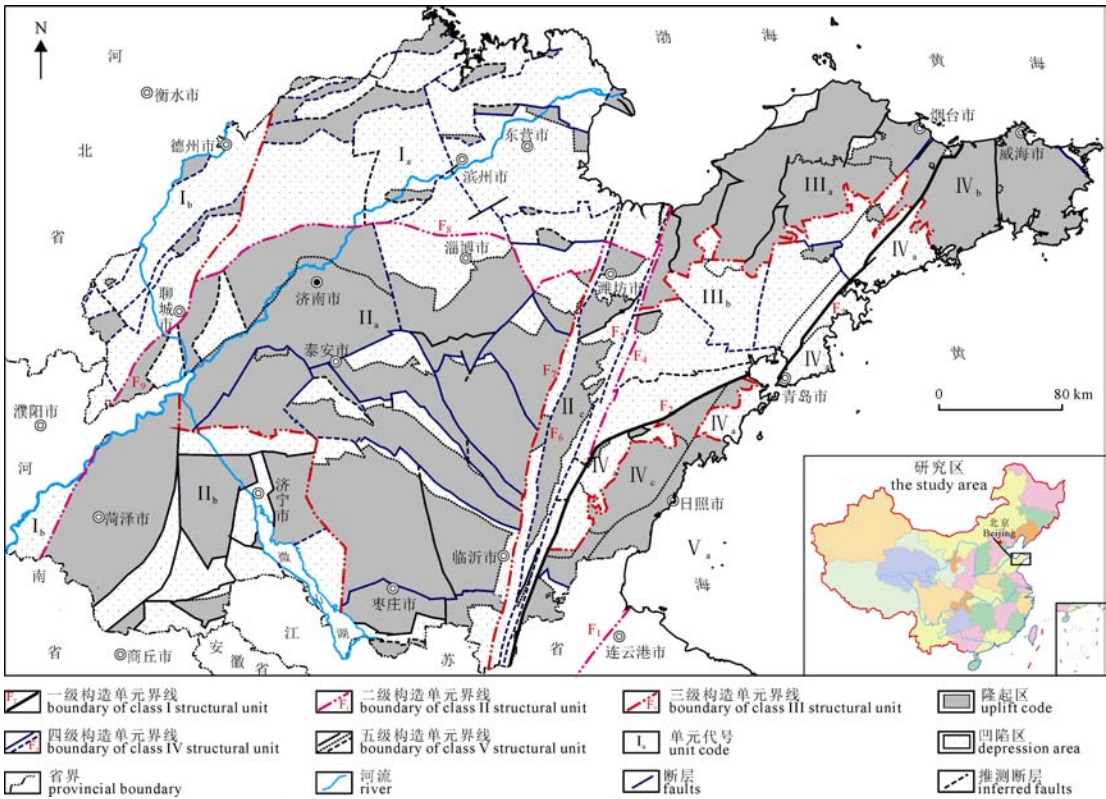
(1) 铁矿床空间分布特征

全省铁矿分布较为广泛, 但由于受成矿地质条件差异性和资源禀赋性影响, 铁矿在鲁西、鲁东地区发育特点迥异(图 2), 鲁西地区以大、中型

表 1 山东省大地构造单元划分表(I—III 级)

Table 1 Division of geotectonic units in Shandong Province (Class I—III)

I 级构造单元	II 级构造单元	III 级构造单元
华北板块	华北坳陷区 I	济阳坳陷 I _a 、临清坳陷 I _b
	鲁西隆起区 II	鲁中隆起 II _a 、鲁西南潜隆起 II _b 、沂沭断裂带 II _c
	胶辽隆起区 III	胶北隆起 III _a 、胶莱盆地西部 III _b
秦岭—大别—苏鲁造山带	胶南—威海隆起区 IV	胶莱盆地东部 IV _a 、威海隆起 IV _b 、胶南隆起 IV _c
	苏北隆起区 V	海州隆起 V _a



区域划分型断裂: F₁—连云港—泗阳—嘉山断裂; F₂—五莲断裂; F₃—牟平—即墨断裂; F₄—昌邑—大店断裂; F₅—安丘—莒县断裂; F₆—沂水—汤头断裂; F₇—郯部—葛沟断裂; F₈—齐河—广饶断裂; F₉—聊城—兰考断裂。
Regional division type faults: F₁—Lianyungang—Siyang—Jiashan Fault; F₂—Wulian Fault; F₃—Muping—Jimo Fault; F₄—Changyi—Dadian Fault; F₅—Anqiu—Juxian Fault; F₆—Yishui—Tangtou Fault; F₇—Tangwu—Gegou Fault; F₈—Qihé—Guangrao Fault; F₉—Liaocheng—Lankao Fault.

图 1 山东省大地构造单元划分图
Fig. 1 Division of tectonic units in Shandong Province

表 2 山东省铁矿成矿作用及矿床信息一览表
Table 2 List of iron ore mineralization and deposit information in Shandong Province

成矿作用分类				详细成因类型	成矿时代	矿床式	典型矿床	矿石品位 /%	矿产地 数量
一级	二级	三级	四级						
内生 矿床	岩浆 作用 矿床	岩浆型 矿床	超基性、基性岩浆 型矿床	与角闪岩、角闪辉石岩有关的磁铁矿床	Pt ₁ /Pt ₂ /Ar ₃	大庙式	祥山铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 30~45	35
				与(富钛/铁)辉石角闪石岩有关的钛磁铁矿床	Ar ₃	肖家沟式	肖家沟、宿山铁 (钛)矿	$\omega(\text{TFe}):$ 11~25	
		接触交 代型矿 床	与中-基性侵入岩 有关的接触交代型 矿床	与角闪闪长岩、黑云母闪长岩、辉石闪长岩等 有关的接触交代型磁铁矿床	K ₁	莱芜式	张家洼、王旺庄、 张马屯、 李屯铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 30~66	78
			与中-酸性侵入岩 有关的接触交代型 矿床	与黑云花岗闪长岩、角闪闪长玢岩、石英(二长) 闪长玢岩等有关的接触交代型磁铁矿床	K ₁	莲子汪式	莲子汪、 郯城铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 30~65	
	岩浆热 液型矿 床			与闪长玢岩、石英闪长岩、二长闪长玢岩、 二长斑岩等有关的接触交代型铁(金铜)矿床	K ₁	铜井式	铜井铁金铜矿、 三岔河铁金矿	$\omega(\text{TFe}):$ 20~55	18
			中低温岩浆热液型 铁矿	与闪长岩、辉石闪长岩等有关的中低温热液 交代充填-风化淋滤型褐(菱)铁矿矿床	K ₁	朱崖式	朱崖、店子、 黑旺铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 30~40	
				与花岗闪长岩、花岗闪长斑岩有关的中高温 热液交代型含铜、金、磁铁矿床	Pt ₃	高旺式	丁家营子铁铜矿	$\omega(\text{TFe}):$ 30~40	8
			中高温岩浆热液型 铁矿						
	变质 作用 矿床	受变质 型矿床	沉积变质型矿床	与粉子山群小宋组浅粒岩、变粒岩、斜长 角闪岩有关的沉积变质型磁铁矿床	Pt ₁	莲花山式	莲花山铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 20~36	162
				与荆山群野头组变粒岩、透辉岩、斜长片麻岩 等有关的沉积变质型磁铁矿床	Pt ₁	马陵式	马陵铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 25~35	
				与济宁群千枚岩、板岩以及火山碎屑岩有关的 沉积变质型磁铁矿床	Ar ₃	济宁式	颜店、翟村铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 22~40	
				与泰山岩群柳杭组黑云变粒岩、角闪黑云变粒 岩有关的沉积变质型磁铁矿床	Ar ₃	杨庄式	北躲庄、锁头 山铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 25~36	
				与泰山岩群山草峪组黑云变粒岩、斜长角闪岩 变粒岩有关的沉积变质型磁铁矿床	Ar ₃	苍峰式	王捻沟、彭集、 单县铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 20~38	
				与泰山岩群雁翎关组角闪质岩石有关的变质 火山沉积型磁铁矿床	Ar ₃	韩旺式	韩旺、卧虎山 铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 30~39	
外生 矿床	沉积 作用 矿床	化学沉 积型矿 床	胶体化学沉积型 矿床	铁铝建造中的赤铁矿-褐铁矿床	C ₂	山西式	南石、八块石、 小张疃铁矿	$\omega(\text{TFe}):$ 20~53	3

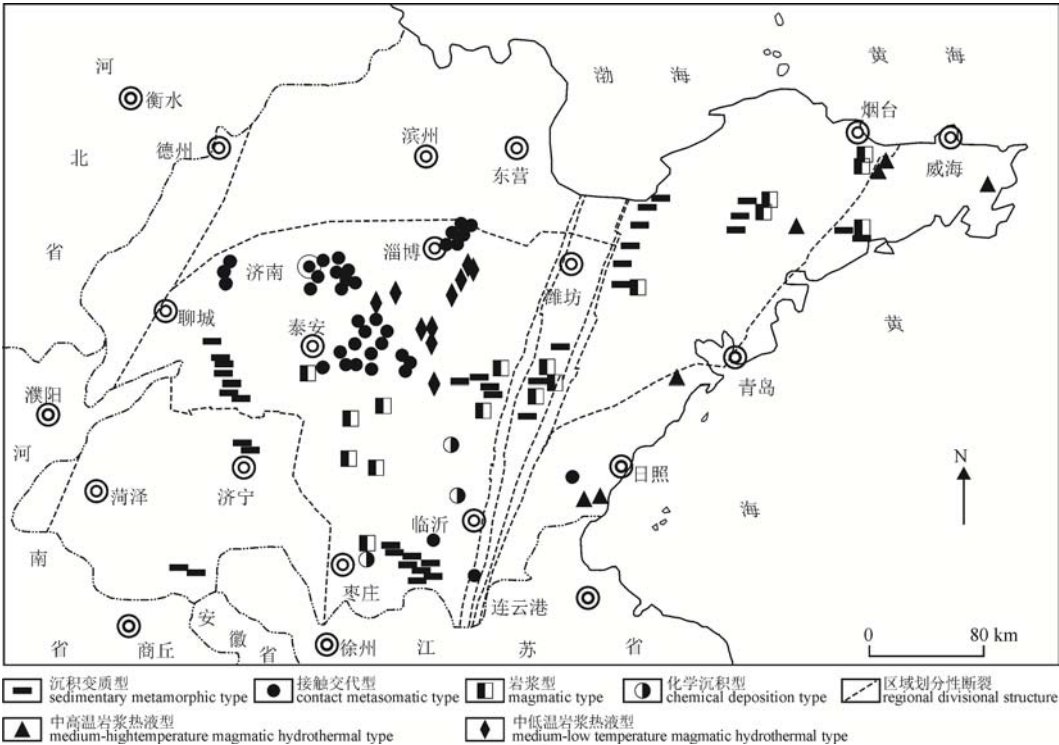


图 2 山东省铁矿矿床类型及空间分布图
Fig. 2 Types and spatial distribution of iron ore deposits in Shandong Province

矿床居多,且集中分布,而鲁东地区铁矿床规模则一般较小,多呈分散分布。全省各个类型铁矿由于受各自不同成矿地质体和控矿要素的影响,在空间上分布呈显著的“属地化”特征;其中韩旺式铁矿分布范围局限于沂源韩旺及沂沭断裂带内的汞丹山凸起中部附近,受其成矿地质体——雁翎关组分布较为局限所致。苍峰式铁矿范围较广,分布在鲁中南、鲁西南地区,是全省最重要的沉积变质型铁矿类型,杨庄式铁矿在沂沭断裂带中段及其附近局部发育(郝兴中等, 2018a)。济宁式铁矿目前仅发现于济宁北部的颜店地区,埋藏于千米之下,其分布范围局限。莲花山式铁矿呈 NNE 向分布于沂沭断裂带东侧的昌邑—莱州地区。

莱芜式铁矿主要分布于莱芜地区、济南城区、金岭地区和齐河—禹城地区等(郝兴中和王巧云, 2016),是全省最重要的富铁矿分布区。莲子汪式铁矿和铜井式共(伴)生铁矿零星分布于鲁中、鲁南等地区,矿床规模较小;大庙式、马陵式铁矿仅零星分布于鲁东烟台、莱州、乳山等局部地区。朱崖式铁矿集中分布于鲁西淄河断裂带及其附近。肖家沟式铁矿发育于沂沭断裂带内及鲁中隆起区东南部沂水、莒县一带,是全省钛铁矿石的主要来源地。山西式铁矿零星分布于泰山—蒙山断隆等地区,矿床规模小,矿体连续性差,工业意义不大。

(2)铁矿床时间分布特征

山东省铁矿成矿时代较多,主要为新太古代、中元古代、新元古代和早白垩世等时期(表 3)。其中沉积变质型铁矿成矿时代较老,主要形成于新太古代和古元古代,此外部分发育于中太古代唐家庄岩组、沂水岩群和新太古代胶东岩群中沉积变质型铁矿因零星分布且规模较小而未分矿床式;接触交代型和中低温岩浆热液型铁矿形成于中生代燕

山晚期;中高温热液型铁矿形成于古元古代和中生代;岩浆型铁矿形成于新太古代和古元古代、中元古代。

此外,肖家沟型(钛)铁矿的成矿地质体为南涝坡变辉长岩和变辉石闪长岩(李俊建等, 2022),成矿时代为新太古代;山西式铁矿形成于晚石炭世,矿体赋存于石炭纪本溪组底部古风化壳中,属化学沉积赤铁矿-褐铁矿层。综上可知,山东省各个类型铁矿成矿时代差异较大,同时在各自地质构造单元内集中成矿。

3 铁矿成矿规律

全省铁矿成因类型及矿体规模的差异是由于在地质历史演化进程中,各时期岩浆在侵入过程中演化分异的差异性、所在侵入地区地层岩性和各类构造系列发育的差异性和各时期地质构造运动的差异性综合作用所致。本文将从地质构造演化控矿、地层控矿、岩体控矿、构造控矿、物探异常示矿等方面对铁矿各项控矿要素进行研究。

3.1 地质构造演化控矿作用

该控矿作用方面主要体现在地球演化历史尺度上,大地构造演化总体控制了铁矿类型的分布。

(1)中太古代—古元古代火山喷发-沉积事件

该时期地壳厚度很薄,来自地幔的基性-超基性岩浆活动频繁且大规模地喷发,提供了巨量的铁质来源,海水中溶解了大量二价铁,随着新太古代大气氧快速增加,溶解于水中的二价铁变为三价铁大量沉淀形成条带状赤铁矿(李厚民等, 2012b)。后经过区域变质改造作用,在古陆核及其边缘形成了新太古代韩旺式、苍峰式、济宁式铁矿以及古元古代莲花山式、马陵式铁矿等。

表 3 山东省主要类型铁矿成矿时代统计表

Table 3 Statistical table of metallogenic ages of the main types of iron ores in Shandong Province

矿床类型	成矿时代	主要典型矿床代表性成矿年龄
朱崖式铁矿	早白垩世	124 Ma(倪振平等, 2016)
莱芜式铁矿	早白垩世	莱芜铁矿(131±3) Ma(韩鑒, 2014); (131±4) Ma, (130±1) Ma(段壮, 2019); 金岭铁矿(126±7) ~ (127±3) Ma, (128±3) Ma(段壮, 2019); 济南铁矿(130.8±5) Ma(杨承海等, 2005); 齐河—禹城铁矿(130.0±2.3) Ma, (131.6±1.7) Ma(王玉往等, 2017)
莲子汪式铁矿	早白垩世	119.25 Ma, 125.36 Ma(倪振平等, 2016)
铜井式铁矿	早白垩世	121.6 Ma, 127.14 Ma, 129.51 Ma(宋明春和王沛成, 2003); 120 Ma(李洪奎等, 2011)
高旺式铁矿	新元古代	870 ~ 1 081 Ma(倪振平等, 2016)
大庙式铁矿	中元古代	1 282 ~ 1 854 Ma(倪振平等, 2016)
莲花山式铁矿	中元古代	2 193 ~ 2 240 Ma(蓝廷广等, 2012)
济宁式铁矿	新太古代	(2 609±13) Ma, (2 561±15) Ma(王世进等, 2009); (2 561±24) Ma(王伟等, 2010)
杨庄式铁矿	新太古代	2.5 ~ 2.6 Ga(赖小东和杨晓勇, 2012)
苍峰式铁矿	新太古代	(2 503±6) Ma, (2 512±6) Ma(郝兴中等, 2017); 2.50~2.55 Ga(万渝生等, 2012)
韩旺式铁矿	新太古代	(2 747±7) Ma, 2 773 Ma(王世进等, 2009); 2.52 Ga(万渝生等, 2012)

(2) 中一新元古代裂解事件

该时期受全球裂解事件影响, 岩浆侵入活动剧烈, 在鲁西地区发生超基性岩浆侵入活动形成了肖家沟式铁(钛)矿床, 在鲁东地区侵入的层状基性侵入体形成了大庙式岩浆型铁矿。

(3) 古一新生代滨太平洋构造-岩浆事件

在古生代晚石炭世早期, 在炎热气候、风化淋滤及流水作用下, 位于奥陶纪碳酸盐岩古风化侵蚀面之上形成了零星分布的铁铝建造, 进而形成了山西式铁矿。中生代在中国东部发生了大规模成矿作用(华仁民和毛景文, 1999), 受太平洋板块 NW 向运动的影响, 沂沭断裂带发生大规模左行平移, 导致鲁西地区 NW 向裂谷发育, 沿断裂发生大规模的剧烈岩浆活动, 且自北向南发生了侵入活动, 岩性从北到南呈基性到酸性的演化趋势, 岩浆侵入及就位过程中与寒武、奥陶纪碳酸盐岩地层发生了接触交代作用, 并在接触带及其附近形成了莱芜式、铜井式、莲子汪式铁矿等; 部分地区的岩浆期后热液活动频繁, 在深大断裂及岩体附近形成了中低温热液-风化淋滤型的朱崖式铁矿。

3.2 地层控矿特征

全省各类型铁矿形成与地层发育较为密切的矿床类型见表 4。中太古代唐家庄岩群和沂水岩群、新太古代胶东岩群、泰山岩群、济宁群与古元古代粉子山群、荆山群是全省沉积变质型铁矿赋矿层位; 寒武纪炒米店组及其上下层位中多分布有中低温岩浆热液型铁矿; 寒武纪—奥陶纪灰岩, 特别是奥陶纪马家沟群灰岩与鲁西地区接触交代型铁矿关系密切, 部分接触交代型铁矿含矿热液

沿裂隙运移到石炭纪地层中并富集成矿。另外, 石炭纪本溪组底部有化学沉积的薄层褐铁矿-赤铁矿层。

3.3 侵入岩控矿特征

在地质历史时期中, 岩浆活动是大多数铁矿床的成矿主要因素(表 5), 其中与侵入岩有关的铁矿床形成时代主要为前寒武纪和中生代, 其中新太古代—新元古代的基性、超基性侵入岩体是肖家沟式钛铁矿、大庙式铁矿和高旺式铁矿的成矿地质体, 中生代的中基性侵入岩体、中酸性侵入岩体是莱芜式、莲子汪式、铜井式、朱崖式等类型铁矿的成矿地质体, 后期岩浆活动有可能对铁矿进行改造和破坏。

3.4 构造控矿特征

各成矿带内构造活动多呈持续性过程, 可分成多个构造层次和活动期次。总体而言, 控制矿床的构造大致可分为控矿构造和控岩构造两个大类, 其中控矿构造是对矿床的形成起到直接作用, 为矿床形成提供了直接储矿空间; 而控岩构造则是通过对成矿密切相关的岩浆活动或沉积作用起主要控制作用, 进而对其相关铁矿床进行控制, 从该角度来看, 控岩构造也是矿床形成的先决条件。此外, 构造系统不仅仅控制着矿床的形成, 同时也在一定程度上对已形成铁矿床(体)进行改造和破坏, 全省各类铁矿床构造运动对矿体控制统计如表 6 所示。

需要说明的是, 在部分矿床中控矿构造、控岩构造划分并不十分明显, 如与朱崖式铁矿密切相关的淄河断裂既是控岩构造也是控矿构造, 具体表现为太河岩体受 NE 向淄河断裂控制, 各铁矿体亦呈串珠状分布于淄河断裂及其分支断裂内。

表 4 山东省铁矿矿床类型、矿产预测类型表
Table 4 Iron ore deposit types and mineral prediction types in Shandong Province

地层时代	控矿地层	沉积建造	矿床类型
石炭纪	月门沟群本溪组	灰岩、黏土岩建造	山西式、莱芜式铁矿
奥陶纪	马家沟群	灰岩、白云岩建造	莱芜式、朱崖式铁矿
寒武纪	九龙群炒米店组	藻灰岩/泥灰岩建造、砾屑灰岩建造	朱崖式铁矿
	九龙群朱砂洞组、张夏组	灰岩建造	莱芜式、铜井式铁矿
新元古代	土门群二青山组	灰岩、页岩建造	莲子汪式铁矿
古元古代	荆山群野头组	碎屑岩建造	马陵式、高旺式铁矿
	粉子山群小宋组	碎屑岩建造	莲花山式铁矿
新太古代	济宁群颜店组	中酸性火山岩及碎屑岩建造	济宁式铁矿
	泰山岩群柳杭组	基性火山岩及碎屑岩建造	杨庄式铁矿
	泰山岩群山草峪组	碎屑岩建造	苍峰式铁矿
	泰山岩群雁翎关组	基性超基性火山岩及碎屑岩建造	韩旺式铁矿
	胶东岩群郭格庄岩组	碎屑岩建造	*沉积变质型
中太古代	沂水岩群林家官庄岩组	基性火山岩及碎屑岩建造	*沉积变质型
	唐家庄岩组	基性火山岩及碎屑岩建造	*沉积变质型

注: *为未分矿床式的沉积变质型铁矿。

3.5 物探异常示矿规律

随着深部找矿工作的逐步推进,物探技术手段在勘查工作中越来越重要,物探异常形态总体受沉积地层、侵入岩体、构造及铁矿体展布形态、规模、埋深、产状、厚度等综合因素影响,如以往勘查工作表明绝大多数铁矿体与磁异常、重力异常具有较好的对应性(表 7, 郝兴中等, 2013a, b), 在已发现的铁矿床处总体表现为“重磁同高”特征, 即铁矿体

发育处具有磁异常较高及梯度较陡、磁化极异常高、重力异常梯度陡和剩余重力异常高的特征。因此, 在找寻沉积变质型、接触交代型和岩浆型铁矿时, 深入研究其物探异常具有重要意义。此外, 朱崖式铁矿床的矿石多为菱铁矿和褐铁矿, 基本无磁性, 不能引起明显磁异常, “山西式”铁矿亦如此; 岩浆型钛铁矿体中磁铁矿含量较少, 需要综合多种找矿标志进行研判。

表 5 山东省铁矿与侵入岩成矿作用一览表
Table 5 List of iron ore and intrusive rock mineralization in Shandong Province

成矿时代	侵入岩建造	含矿性	矿产类型	产地
中生代	闪长岩、辉长岩	菱铁矿、褐铁矿	朱崖式铁矿	淄博
	角闪闪长岩、闪长玢岩、花岗闪长岩	磁铁矿	莲子汪式铁矿	郯城、兰陵
	闪长玢岩、石英闪长岩、二长闪长玢岩	磁铁矿	铜井式	沂南、钢城
	正长闪长岩、辉石闪长岩、辉长岩	磁铁矿	莱芜式铁矿	济南、莱芜、金岭
	二长花岗岩	磁铁矿	岩浆热液型铁矿	莱州
	侏罗纪	含黑云二长花岗岩	磁铁矿	岩浆热液型铁矿
新元古代	花岗质片麻岩	磁铁矿	高旺式铁矿	坪上、高旺
中元古代	变辉石角闪石岩、变辉长岩、变辉石橄榄石岩	磁铁矿	大庙式铁矿	乳山
古元古代	变辉石角闪石岩、变辉长岩、变辉石橄榄石岩	磁铁矿	大庙式铁矿	莱州
新太古代	变(角闪)辉长岩、黑云角闪闪长岩	磁铁矿、钛铁矿	大庙式铁矿 肖家沟式铁矿	泰安、新泰、泗水、邹城、 莱阳、沂水、莒县

表 6 山东省铁矿构造控矿特征表
Table 6 Ore-controlling characteristics of iron ore structures in Shandong Province

构造类型	矿床式	矿床类型
控矿构造	莱芜式、莲子汪式	侵入岩体和地层间接触带构造及其附近断裂构造交会部位、岩体凹部构造、层间破碎构造、捕虏体构造、地层张性裂隙构造等
	韩旺式、杨庄式、苍峰式、济宁式、莲花山式	褶皱构造对铁矿体的富集增厚起到直接控制作用, 其中铁矿带内背斜、向斜构造发育地段铁矿体多呈透镜状、马鞍状、牛轭状等
	马陵式	受控于荆山群野头组构造形变和后期岩浆侵入时叠加构造改造
	朱崖式	铁矿床受 NE 向淄河断裂及其分支断裂控制, 含矿热液在断裂和其两侧围岩裂隙、溶洞内富集成矿
	山西式	沿石炭纪和奥陶纪地层不整合面局部富集
	莱芜式、莲子汪式	与铁矿床密切相关的侵入岩及展布多数与深大断裂密切相关, 岩浆多就位于该深大断裂、断裂交会部位及其附近
控岩构造	大庙式	受控于主干断裂带及其附近古元古代超基性侵入岩体附近, 受后期燕山期区域性侵入岩体叠加改造
	肖家沟式	在沂沭断裂带内及其附近新太古代基性-超基性侵入岩体中
	朱崖式	与铁矿床密切相关的岩体(如太河岩体)受淄河断裂及其分支断裂控制

表 7 主要类型铁矿床物探异常示矿特征表
Table 7 Characteristics of geophysical prospecting anomalies of the main types of iron deposits

要素分类	详细特征描述
矿石物性特征	铁矿石多具有强磁性、高密度性、低电阻性和高极化性, 与其围岩多具有明显差异
磁性特征	在磁异常明显, 且异常强度较高, 部分梯度较陡地段具有较好找矿前景; 铁矿体多与化极磁异常对应较好; 磁异常强度较高处并伴有负异常多为铁矿体所引起
重力特征	铁矿体多在重力梯度带上, 或呈现低背景中的重力高, 剖面上呈现局部重力高的地段
电性特征	在低阻或高低阻转换带是铁矿体发育部位
地震特征	地震波谱对成矿地质体、控矿地层、控矿构造部位等反射特征

4 铁矿成矿系列分析

综合研究区内铁矿成矿时代、成因类型、矿产特征等, 根据矿床成矿系列理论依据(陈毓川, 1994; 陈毓川等, 2006, 2016)、山东省成矿系列研究成果(于学峰等, 2015)和山东省地质矿产志的相关研究成果, 本次研究工作对以往工作进行了汇总分析和综合研究, 形成了山东省与铁矿床相关的矿床成矿系列(表 8)。

5 铁矿找矿预测模型与综合勘查体系

5.1 铁矿找矿预测模型

根据区域及省内成矿规律研究工作(赵一鸣等, 1986; 叶天竺等, 2014, 2017; 郝兴中等, 2018b), 建立了以控矿地层、控矿岩浆岩、控矿构造、地球物理异常特征方面为基础的综合找矿预测模型(表 9)。

表 8 山东省与铁矿床相关的矿床成矿系列
Table 8 Metallogenic series of iron ore deposits in Shandong Province

矿床成矿系列	矿床成矿亚系列	矿床式
鲁西地区与燕山晚期岩浆侵入作用有关的 Fe-Cu-Pb-Zn-Au 矿床成矿系列	鲁中地区中南部与早白垩世中酸性岩浆侵入有关的 Fe-Cu-Pb-Zn 矿床成矿亚系列	莲子汪式、铜井式、朱崖式
	鲁中地区中北部与早白垩世中基性岩浆侵入有关的 Fe(Cu-Co)矿床成矿亚系列	莱芜式
鲁西地区与石炭—二叠纪沉积作用有关的煤-铝土矿-REE-稀散元素-耐火黏土-铁-玻璃石英砂岩矿床成矿系列	鲁西地区与晚石炭世早-中期滨浅海相沉积有关的铝土矿-耐火黏土-铁矿床成矿亚系列	山西式
胶南-威海地区与晋宁期超基性-中酸性岩浆侵入作用有关的石棉-蛇纹岩(玉石-铜镍)Fe 矿床成矿系列	胶南-威海地区南部与晋宁期岩浆侵入期后热液活动有关的矿床成矿亚系列	高旺式
胶北地区与古元古代末-中元古代早期基性、超基性岩浆侵入作用有关的 Fe-磷矿床成矿系列	胶北地区与古元古代末-中元古代早期基性岩浆侵入作用有关的钛磁铁矿、磷矿床成矿亚系列	大庙式
胶北地区与古元古代火山-沉积变质(改造)作用有关的铁-菱铁矿-滑石-石墨矿床成矿系列	胶北地区与古元古代沉积变质(改造)作用有关的铁矿床成矿亚系列	莲花山式、马陵式
鲁西地区与新太古代基性、超基性岩浆侵入、火山喷发、沉积变质作用有关的 Fe-Ti(Fe)-Au-Cu(Ni)-泰山玉矿床成矿系列	鲁西地区与新太古代末期基性、超基性岩浆侵入有关的 Fe-Ti(Fe)-Cu-Ni(PGE)-泰山玉矿床成矿亚系列	肖家沟式
	鲁西地区与新太古代末期中酸性火山喷发沉积变质作用有关的铁矿床成矿亚系列	济宁式
	鲁西地区新太古代中-晚期与基性、超基性火山喷发沉积变质作用有关的铁矿床成矿亚系列	杨庄式、苍峰式、韩旺式

表 9 山东省铁矿综合找矿预测模型表
Table 9 Prediction model for comprehensive prospecting of iron ore in Shandong Province

矿床式	主要控矿地层	主要控矿岩浆岩	主要控矿构造	地球物理异常特征
大庙式	荆山群	角闪岩、角闪辉石岩	——	重磁异常显著部位
肖家沟式	——	(富钛/铁)辉石角闪石岩	构造控矿不明显, 具张扭性裂隙	
莱芜式	寒武系、奥陶系、石炭系	早白垩世中基性侵入岩	接触带构造、层间滑脱面、地层不整合面、裂隙构造发育处	重磁异常显著部位、电法异常高低阻转换部位 地震反映的地层/侵入岩界面
莲子汪式	南华系、震旦系、寒武系	早白垩世中酸性侵入岩	接触带构造、层间滑脱面、地层不整合面、裂隙构造发育处	
铜井式	南华系、寒武系、奥陶系	早白垩世中酸性侵入岩	接触带构造、层间滑脱面、地层不整合面、裂隙构造发育处	
朱崖式	寒武系、奥陶系	闪长岩、辉石闪长岩	主干断裂和分支断裂控矿显著	物探异常不明显
高旺式	荆山群野头组	花岗闪长岩、花岗闪长斑岩	褶皱明显发育处矿体变厚	重磁异常显著部位、电法异常低阻部位
莲花山式	粉子山群小宋组	——	褶皱明显发育处矿体变厚	
马陵式	荆山群野头组	——	褶皱明显发育处矿体变厚	
济宁式	济宁群颜店组	——	褶皱明显发育处矿体变厚	重磁异常显著部位
杨庄式	泰山岩群柳杭组	——	褶皱明显发育处矿体变厚	重磁异常显著部位、电法异常低阻部位
苍峰式	泰山岩群山草峪组	——	褶皱明显发育处矿体变厚	
韩旺式	泰山岩群雁翎关组	——	褶皱明显发育处矿体变厚	
山西式	本溪组	——	奥陶系和石炭系不整合面	物探异常不明显

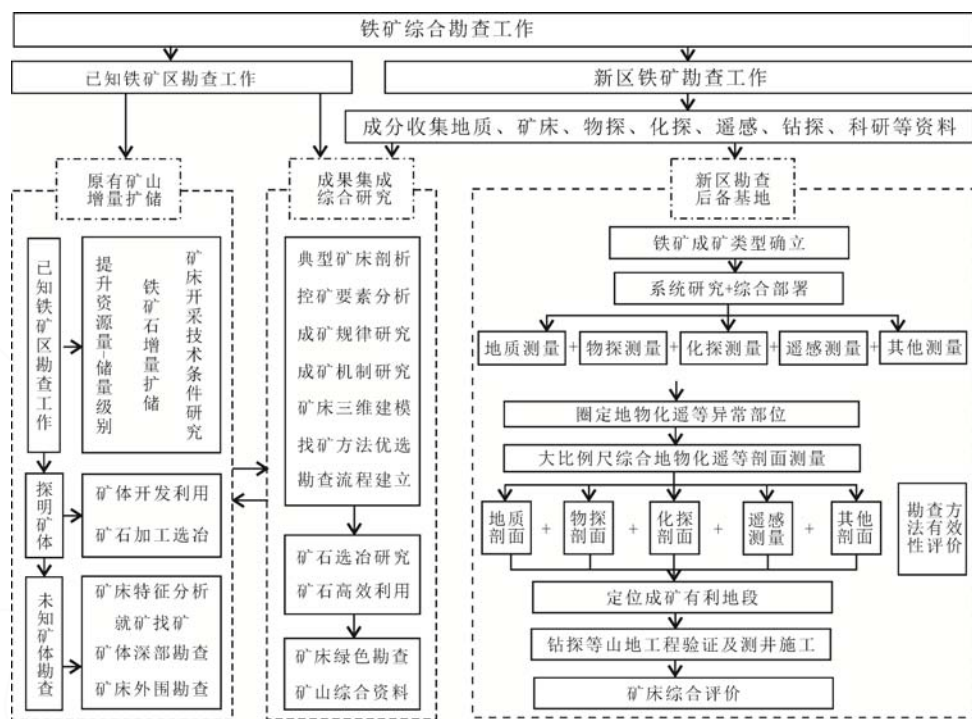


图3 研究区铁矿勘查技术体系示意图

Fig. 3 Schematic map of iron ore exploration system in the study area

5.2 铁矿综合勘查体系

一般而言,铁矿勘查工作主要分为已知区勘查工作和新区勘查工作,通过系统梳理研究区铁矿勘查成果和找矿经验,充分吸收国内相关地区勘查经验(汪青松等, 2021; 韩润生和赵冻, 2022; 黄旭钊等, 2022; 江彪等, 2022),本次研究工作针对研究区铁矿评价工作构建了如下勘查技术体系(图3)。

(1)在已知铁矿区的勘查工作主要功能为增量扩储,提升已知矿体勘查精度,并延长矿山服务年限等,因此需按照该矿区的铁矿勘查现状逐步提高各个铁矿体控制程度,对于探明的矿体可适时进行矿山开发利用;而对于未知矿体需通过就矿找矿、加强已知矿体深部及外围勘查工作,以达到增量扩储及提升资源量或储量级别的目的,为下一步矿床开发提供依据。

(2)在新区的铁矿勘查工作主要功能为发现新矿床,并为今后勘查工作提供后备基地,该项工作则需要首先确立新区铁矿的矿床类型,通过综合分析研究,选择有针对性的面积性地质、物探、化探、遥感等技术方法确定目标区地物化遥等异常部位,对找矿技术手段有效性开展综合研究和评价分析,优选适合探测目标矿体的大比例尺地物化遥等综合剖面来定位深部铁矿有利赋存地段,最后运用钻探等山地工程及测井工作对深部铁矿体进行验证,通过对深部矿体进行综合评价,以达到增加铁矿后备基地的效果。

(3)矿床综合研究工作是所有矿床勘查工作中

贯穿始终的一项任务,旨在为已知矿区和新区的勘查工作提供“智力支持”;因此,铁矿勘查工作均需要在成果集成和综合研究的指导下,正确有效合理地开展找矿工作,以获取最优的勘查成果。

6 找矿远景预测分析

在梳理全省地质矿产特征、勘查成果和铁矿成矿规律的基础上,本次研究对山东省铁矿勘查方向和前景进行综合评价。

6.1 铁矿找矿预测依据

(1)已有铁矿深部和边部找矿预测

“就矿找矿”、“探边摸底”、“攻深找盲”是多数矿山勘查的首选方向,这既增加了已有矿山的勘查深度,同时对勘查技术要求较高,对于发现盲矿体,增加矿山资源储量和服务年限都有十分重要的意义。山东省目前已经完成大规模开发或正在开发的铁矿属地主要有济南、淄博、临沂、枣庄、潍坊、泰安、济宁、烟台、青岛、日照等。在上述各地区的铁矿类型中沉积变质型铁矿最为广泛,约占已探明资源储量的90%,其次接触交代型铁矿约占已探明资源储量的6%。不同类型的铁矿床产出的大地构造部位也不同,沉积变质型铁矿床虽分布范围较广,但97%的蕴藏量主要分布在鲁西隆起区;接触交代型铁矿床主要赋存于鲁中地区(济南、莱芜、淄博和德州等地区),截至目前,上述已知铁矿床产地仍是全省除进口外铁矿石的主要来源和勘查开发的首选地区。

(2) 已有矿山外围异常找矿预测

这是已有矿山进入到整体勘查的新阶段, 对铁矿带外围异常开展整体研究、综合找矿、综合评价、综合利用是目前矿产勘查的趋势。在一个较大的矿床周围多会发育一些规模较小的矿床(体), 这些规模小的矿床多会形成一定规模的物探(矿致)异常, 除目前正在开发的铁矿床外, 莱芜地区、金岭地区、韩旺铁矿带、苍峰铁矿带、东平—汶上铁矿带、昌邑铁矿带、淄河铁矿带等已有铁矿床深部及外围将是进一步增储工作的主要地段, 同时其周边次级物探异常是今后铁矿勘查增储工作的重点部位。近年来, 在省内铁矿勘查工作取得了显著成就, 其中取得重要找矿突破地区如德州齐河—禹城地区、聊城高唐县郭店村地区(郝兴中等, 2018c)和东阿单庄地区(张岩等, 2018)、济宁颜店地区(宋明春等, 2016)、梁山地区(赵蕪等, 2016)、菏泽单县大刘庄—龙王庙地区(郝兴中等, 2014)是全省铁矿的重要储备基地, 可根据铁矿勘查技术手段和供需形势适时进行深入勘查和开发利用。

(3) 低缓磁异常区找矿预测

随着地质勘查工作的逐步深入, 深部找矿已经是当前及今后相当长一段时间内矿产勘查工作的重点, 物探找矿的重要性就逐渐凸显出来(陈伟军等, 2008; 郭延明等, 2017)。全省厚覆盖区主要处于济宁—菏泽、德州—聊城、济南—淄博一线之间、沂沭断裂带的贡丹山凸起两侧地区、昌邑—莱州等。由于磁法技术手段是铁矿勘查工作的首选方法, 全

省低缓磁异常研究是主要方向; 如对于沉积变质型铁矿和矽卡岩型铁矿而言, 近年来通过对单县龙王庙低缓磁异常、东阿单庄低缓磁异常、齐河—禹城低缓磁异常等的勘查工作取得了重大找矿进展与突破(郝兴中等, 2013a, 2014, 2018d; 张岩等, 2018); 此外, 郝兴中等(2022)在鲁西地区开展铁矿调查评价工作时, 在苍峰铁矿带西段圈定了山湾东等 6 处找矿靶区, 显示在已有铁矿带周邻的低缓磁异常区仍有很大勘查前景。

(4) 新区矿产找矿预测

根据相关地区地质特征、物探异常、矿产勘查和科学研究等资料, 在充分研究成矿规律的基础上, 利用铁矿综合找矿模型与研究区地质特征进行对比分析, 在对目标区铁矿成矿可行性进行充分探讨的基础上进行综合勘查, 郝兴中等(2014, 2016)在鲁西地区开展铁矿调查评价研究工作时, 在金乡—嘉祥地区圈定了 1 处找矿远景区; 在曹县—成武一带圈定了安仁集等 4 个找矿靶区, 这表明在鲁西深覆盖区铁矿找矿潜力较大。

6.2 成矿远景区划分

在全面分析全省地层、构造、岩浆岩、物探异常和矿产信息的基础上, 在研究区综合找矿预测模型和相关成矿预测理论的指导下(肖克炎等, 2010a, b, 2015; 王登红等, 2011; 郎兴海等, 2017; 史蕊等, 2018; 郝兴中等, 2020; 樊铭静等, 2022), 通过对比分析铁矿综合找矿预测模型, 此次研究共圈定了 36 处铁矿远景区(图 4、表 10); 其中沉积变质型

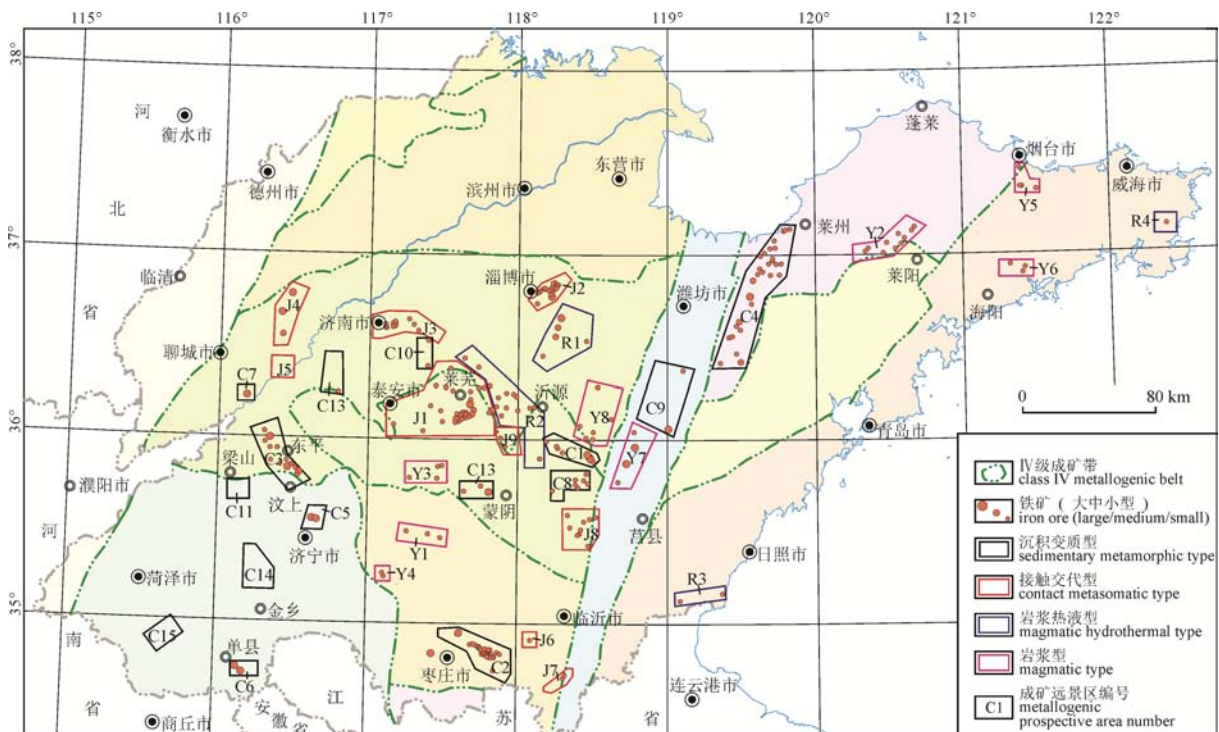


图 4 研究区铁矿找矿预测示意图

Fig. 4 Schematic map of iron ore prospecting prediction in the study area

表 10 山东省主要类型铁矿床物探异常示矿特征表
Table 10 Characteristics of geophysical prospecting anomalies of the main types of iron deposits in Shandong Province

序号	铁矿远景区	找矿类型	级别	序号	铁矿远景区	找矿类型	级别
C1	韩旺铁矿远景区	韩旺式	A	J4	齐河—禹城铁矿远景区	莱芜式	A
C2	苍峰铁矿远景区	苍峰式	A	J5	东阿牛角店铁矿远景区	莱芜式	B
C3	东平—汶上铁矿远景区	苍峰式	A	J6	兰陵铁矿远景区	莲子汪式	A
C4	昌邑—莱州铁矿远景区	莲花山式	A	J7	郯城铁矿远景区	莲子汪式	A
C5	济宁铁矿远景区	济宁式	B	J8	铜井铁矿远景区	铜井式	A
C6	单县铁矿远景区	苍峰式	B	J9	里辛铁矿远景区	铜井式/莱芜式	B
C7	东阿单庄铁矿远景区	苍峰式	B	R1	淄河铁矿远景区	朱崖式/韩旺式	A
C8	沂水夏蔚铁矿远景区	苍峰式	B	R2	莱芜—蒙阴铁矿远景区	朱崖式	B
C9	沂水杨庄铁矿远景区	杨庄式	B	R3	坪上—东港铁矿远景区	高旺式	A
C10	长清垛庄铁矿远景区	苍峰式	B	R4	荣成铁矿远景区	高旺式	A
C11	梁山南铁矿远景区	苍峰式	C	Y1	泗水泗张铁矿远景区	大庙式	A
C12	蒙阴西铁矿远景区	苍峰式	C	Y2	莱阳西铁矿远景区	大庙式/马陵式	A
C13	长清马山铁矿远景区	苍峰式	C	Y3	新泰谷里铁矿远景区	大庙式	B
C14	金乡—嘉祥铁矿远景区	苍峰式	C	Y4	邹城看庄铁矿远景区	大庙式	B
C15	曹县—成武铁矿远景区	苍峰式	C	Y5	烟台南铁矿远景区	大庙式/高旺式	B
J1	莱芜铁矿远景区	莱芜式	A	Y6	乳山西铁矿远景区	大庙式/马陵式	B
J2	金岭铁矿远景区	莱芜式	A	Y7	棋山—马站钛铁矿远景区	肖家沟式	A
J3	济南城区铁矿远景区	莱芜式	A	Y8	沂水诸葛钛铁矿远景区	肖家沟式	A

铁矿共 15 处, 接触交代型铁矿共 9 处, 岩浆热液型铁矿共 4 处, 岩浆型铁矿共 8 处。在上述 36 处靶区中, A 类靶区 18 处, B 类靶区 13 处, C 类靶区 5 处。由表 9 可知, 沉积变质型铁矿和接触交代型铁矿仍是全省今后铁矿勘查工作的重点。由于韩旺式、苍峰式、杨庄式、莲花山式、马陵式铁矿赋存在泰山岩群雁翎关组、山草峪组、柳杭组、粉子山群小宋组、荆山群野头组中, 含矿层位分布广, 该类型铁矿资源潜力大; 因此韩旺铁矿远景区、苍峰铁矿远景区、东平—汶上铁矿远景区和昌邑—莱州铁矿远景区是该类勘查开发的重点地区。莱芜式铁矿是全省富铁矿石的主要来源, 其中莱芜铁矿远景区、金岭铁矿远景区是该类铁矿勘查开发的重点地区。由于矿床埋藏深度大, 勘查程度较低, 开采技术限制等原因, 单县铁矿远景区、济宁铁矿远景区、东阿单庄铁矿远景区、齐河—禹城铁矿远景区是现阶段勘查热点和铁矿后备基地。在鲁中隆起中北部的部分低缓磁异常具有一定的勘查找矿前景, 是该类型铁矿取得找矿突破的潜在勘查区。

7 结论

(1)通过对全省铁矿综合分析, 山东省铁矿类型分岩浆型矿床、接触交代型矿床、岩浆热液型矿床、受变质型矿床和化学沉积型矿床共 5 个矿床类型和大庙式、肖家沟式、莱芜式、莲子汪式、铜井式、朱崖式、高旺式、莲花山式、马陵式、济宁式、杨庄式、苍峰式、韩旺式和山西式共 14 个矿床式。

(2)全省铁矿成矿规律研究表明, 全省铁矿成矿

时代较多, 主要为新太古代、中元古代、新元古代、早白垩世等, 另外中太古代和晚石炭世也有部分铁矿床零星产出。各铁矿类型受到地质构造演化控矿、地层控矿、岩体控矿、构造控矿等控制程度差异较大; 如地层控矿方面尤以沉积变质型、化学沉积型较为突出, 岩体控矿方面尤以岩浆型铁矿最为显著, 而接触交代型铁矿则是地层控矿、岩体控矿、构造控矿联合作用的结果。

(3)本次工作构建了研究区铁矿综合勘查技术体系, 通过对已知区勘查工作和新区勘查工作的具体分析, 构建了适合其各自找矿目的的勘查技术体系, 同时提出综合研究作为各自勘查区找矿工作提供了重要保障。

(4)研究表明沉积变质型铁矿和接触交代型铁矿仍然是全省今后铁矿勘查工作的重点; 金岭铁矿远景区、莱芜铁矿远景区、沂源韩旺铁矿远景区、苍峰铁矿远景区、东平—汶上铁矿远景区、昌邑—莱州铁矿远景区、淄河铁矿远景区等是目前铁矿开发的重点地区; 齐河禹城铁矿远景区、单县铁矿远景区、济宁铁矿远景区、东阿单庄铁矿远景区也是今后开展深部找矿的重要远景区。

(5)通过对全区铁矿的时空分布特征对比分析和成矿规律研究, 划分了全省铁矿成矿系列, 并总结了综合找矿预测模型。本次研究共圈定了苍峰铁矿远景区、莱芜铁矿远景区、淄河铁矿远景区和莱阳西铁矿远景区等 36 处; 其中沉积变质型铁矿圈定了 15 处, 接触交代型铁矿圈定了 9 处, 岩浆热液型铁矿圈定了 4 处, 岩浆型铁矿圈定了 8 处。在上述 36 处

靶区中, A类远景区 18 处, B类远景区 13 处, C类远景区 5 处, 本次研究为今后全省铁矿找矿工作提供了部署依据和勘查方向。

致谢: 对审稿专家在审稿过程中, 对本文提出修改建议和意见, 在此致以最衷心的感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by Shandong Natural Science Foundation Project (No. ZR2020MD033), China Geological Survey (Nos. DD2016005223 and DD20190166), and Investigation on the National Conditions of Mineral Resources in Shandong Province (lkbb [2020] No. 1).

参考文献:

- 安茂国. 2019. 山东省苍峰铁矿带成矿规律与找矿方向研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-83.
- 陈伟军, 刘红涛, 刘建明, 曾庆栋, 于昌明, 叶杰. 2008. 隐伏矿床定位预测常用的综合物化探方法[J]. 有色矿冶, 24(2): 2-7.
- 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. 2006. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 10: 1501-1508.
- 陈毓川. 1994. 矿床的成矿系列[J]. 地学前缘, 1(3-4): 90-94.
- 段壮. 2019. 山东莱芜地区矽卡岩型铁矿床成矿作用与成矿机制研究[D]. 武汉: 中国地质大学: 1-190.
- 樊铭静, 肖克炎, 徐旸. 2022. 全球关键矿产资源潜力评价理论方法的发展趋势与进展[J]. 科学技术与工程, 22(1): 1-17.
- 郭延明, 郝兴中, 钟伟杰, 汝亮, 赵诚亮. 2017. 地面高精度磁测在隐伏铁矿勘查中的应用: 以山东省禹城市李屯地区铁矿为例[J]. 山东国土资源, 33(10): 53-57.
- 韩鑫. 2014. 山东莱芜含矿岩体成因及其与铁矿的关系[D]. 北京: 中国地质大学: 8-53.
- 韩润生, 赵冻. 2022. 初论岩浆热液成矿系统控岩控矿构造深延格局研究方法[J]. 地学前缘, 29(5): 420-437.
- 郝兴中, 李洪奎, 李英平, 王巧云. 2017. 山东单县地区 BIF 型铁矿成矿时代—SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. 山东国土资源, 33(3): 1-7.
- 郝兴中, 李洪奎, 彭观峰, 王巧云, 智云宝, 张华平, 张春池. 2022. 鲁西苍峰铁矿带西延隐伏区 BIF 型铁矿成矿预测[J]. 山东国土资源, 38(3): 1-7.
- 郝兴中, 李英平, 杨毅恒, 王英鹏. 2014. 山东单县覆盖区铁矿特征及找矿方向研究[J]. 山东国土资源, 30(3): 56-61.
- 郝兴中, 刘伟, 臧凯, 张学松. 2018b. 鲁西潘店地区矽卡岩型铁矿成矿规律初探[J]. 山东国土资源, 34(7): 27-33.
- 郝兴中, 王巧云. 2016. 鲁中隆起区中北部矽卡岩型铁矿成矿预测[J]. 地质学刊, 40(3): 443-449.
- 郝兴中, 杨毅恒, 李洪奎, 李英平. 2018a. 鲁西地区“杨庄式”铁矿的命名与预测模型[J]. 科学技术与工程, 18(6): 65-72.
- 郝兴中, 杨毅恒, 李英平, 高华丽. 2013b. 山东省苍峰铁矿带预测模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1136-1142.
- 郝兴中, 杨毅恒, 李英平, 王巧云, 王英鹏, 王立功. 2013a. 综合找矿方法在覆盖区的应用——以山东省单县大刘庄铁矿勘查为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(2): 641-648.
- 郝兴中, 杨毅恒, 李英平, 王巧云. 2018d. 山东成武—曹县地区磁异常特征及铁矿预测[J]. 地球物理学进展, 33(2): 613-619.
- 郝兴中, 杨毅恒, 刘伟. 2018c. 山东潘店地区矽卡岩型铁矿地质特征及找矿意义[J]. 科学技术与工程, 18(20): 51-58.
- 郝兴中, 郑金明, 刘伟, 王润生, 王巧云, 张贵丽. 2020. 山东省齐河—禹城地区矽卡岩型铁矿成矿预测[J]. 地球学报, 41(2): 293-302.
- 郝兴中. 2014. 鲁西地区铁矿成矿规律与预测研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. 矿床地质, 18(4): 300-308.
- 黄旭钊, 范正国, 何敬梓, 葛藤菲, 王思浚, 满毅, 王鹏, 李军, 王恒. 2022. 隐伏岩浆型铜镍矿空—地—井协同勘查技术体系[J]. 物探与化探, 46(3): 597-607.
- 贾逸卿, 张艳飞, 陈小荣, 陈其慎, 龙涛, 齐刚, 陈升立. 2021. 京津冀地区铁矿石需求预测[J]. 地球学报, 42(2): 217-222.
- 江彪, 王登红, 马玉波, 蒲秀浪, 刘建宏, 樊新祥, 赵吉昌, 叶红刚, 胡小春, 陈晔, 徐沛斌, 范宗福. 2022. 北山及其相邻地区主要矿床类型、找矿新进展及方向[J]. 地质学报, 96(6): 2206-2216.
- 金子梁. 2017. 矽卡岩型富铁矿成因研究——以鲁西淄博和莱芜铁矿为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-102.
- 孔庆友, 张天祯, 于学峰, 徐军祥, 潘元林, 李献水. 2006. 山东矿床[M]. 济南: 山东科学技术出版社: 291-346.
- 赖小东, 杨晓勇. 2012. 鲁西杨庄条带状铁建造特征及锆石年代学研究[J]. 岩石学报, 28(11): 3612-3622.
- 蓝廷广, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 郑小礼, 张华东. 2012. 鲁东昌邑古元古代 BIF 铁矿床地球化学特征及矿床成因讨论[J]. 岩石学报, 28(11): 3595-3611.
- 郎兴海, 崔志伟, 王旭辉, 邓煜霖, 谢富伟, 韩鹏, 杨宗耀, 张忠, 黄勇, 李志军, 尹青, 张金树, 丁枫, 董树义, 王子正, 张丽. 2017. 西藏谢通门县雄村矿集区综合信息找矿模型及靶区预测[J]. 地球学报, 38(5): 790-802.
- 李洪奎, 耿科, 李逸凡, 赓传源. 2011. 沂南县铜井金矿床锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 30(3): 497-503.
- 李洪奎, 郝兴中. 2016. 鲁西地区铁矿成矿规律研究[M]. 北京: 地质出版社: 156-173.
- 李厚民, 陈毓川, 李立兴, 王登红. 2012b. 中国铁矿成矿规律[M]. 北京: 地质出版社: 142-182.
- 李厚民, 王登红, 李立兴, 陈靖, 杨秀清, 刘明军. 2012a. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J]. 中国地质, 39(3): 559-580.
- 李俊建, 党智财, 彭翼, 张彤, 宋立军, 倪振平, 郭国海. 2022. 华北地区铁矿资源成矿规律初探[J]. 华北地质, 45(1): 79-91.
- 马吉宇. 2017. 铁矿石国际贸易研究综述[J]. 中国矿业, 26(增刊 2): 102-107.
- 马明, 高继雷. 2018. 莱芜三岔河铁金矿床的发现及其特征[J]. 山东国土资源, 34(10): 43-48.
- 倪振平, 田京祥, 王来明, 李庆平. 2016. 山东省重要矿产区域成矿规律[M]. 济南: 山东科学技术出版社: 61-124.
- 史蕊, 张颖慧, 卢民杰, 匡海阳, 张国利. 2018. 基于地质与重磁数据集成的河北迁安铁矿集区三维成矿预测[J]. 地球学报, 39(6): 762-770.
- 宋明春, 焦秀美, 张成基, 张增奇, 胡树庭, 李世勇, 李哲, 李培远. 2016. 山东省济宁群的地层序列和形成环境[J]. 地层学杂志, 40(1): 26-40.
- 宋明春, 王沛成. 2003. 山东省区域地质[M]. 济南: 山东省地图出版社: 1-356.
- 万渝生, 董春艳, 颜颜强, 王世进, 宋明春, 徐仲元, 王世炎, 周红英, 马铭株, 刘敦一. 2012. 华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代——SHRIMP 锆石 U Pb 定年[J]. 地质

学报, 86(9): 1447-1478.

- 汪青松, 张金会, 张顺林, 张家嘉, 产思维, 程培生, 崔先文, 张凯. 2021. 厚覆盖区找矿“循环渐进式勘查技术体系”与应用[J]. 地质论评, 67(4): 1129-1146.
- 王安建, 高蕊蕊. 2020. 中国能源与重要矿产资源需求展望[J]. 中国科学院院刊, 35(3): 338-344.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 陈郑辉, 沈保丰, 汤中立, 裴荣富. 2011. 成矿体系的研究进展及其在成矿预测中的应用[J]. 地球学报, 32(4): 385-395.
- 王世进, 万渝生, 张成基, 杨恩秀, 宋志勇, 王立法, 王金光. 2009. 山东早前寒武纪变质地层形成年代——锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据[J]. 山东国土资源, 25(10): 18-24.
- 王伟, 王世进, 刘敦一, 李培远, 董春艳, 颀颀强, 马铭株, 万渝生. 2010. 鲁西新太古代济宁群含铁岩系形成时代——SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. 岩石学报, 26(4): 1175-1181.
- 王玉往, 解洪晶, 石煜, 周国超. 2017. 山东省齐河—禹城地区接触交代型富铁矿综合信息找矿预测地质模型[R]. 北京: 北京矿产地质研究院: 15-55.
- 肖克炎, 程松林, 姜德波, 孙莉. 2010a. 区域矿产定量评价的矿床综合信息评价模型[J]. 地质通报, 29(10): 1430-1444.
- 肖克炎, 李楠, 王琨, 孙莉, 范建福, 丁建华. 2015. 大数据思维下的矿产资源评价[J]. 地质通报, 34(7): 1266-1272.
- 肖克炎, 叶天竺, 李景朝, 杨毅恒, 丁建华, 姜德波. 2010b. 矿床模型综合地质信息预测资源量的估算方法[J]. 地质通报, 29(10): 1404-1412.
- 谢承祥, 李厚民, 王瑞江, 肖克炎. 2009. 中国查明铁矿资源储量的数量、分布及保障程度分析[J]. 地球学报, 30(3): 387-394.
- 杨承海, 许文良, 杨德彬, 刘长春, 柳小明, 胡兆初. 2005. 鲁西济南辉长岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年证据[J]. 地球学报, 26(4): 321-325.
- 叶天竺, 吕志成, 庞振山. 2014. 勘查区找矿预测理论与方法(总论)[M]. 北京: 地质出版社: 186-190.
- 叶天竺, 韦昌山, 王玉往, 祝新友, 庞振山. 2017. 勘查区找矿预测理论与方法(各论)[M]. 北京: 地质出版社: 319-352.
- 于学峰, 张天祯, 王虹. 2015. 山东矿床成矿系列[M]. 北京: 地质出版社: 13-631.
- 曾广湘, 吕昶, 徐金芳. 1998. 山东铁矿地质[M]. 济南: 山东科学技术出版社: 49-84.
- 张岩, 张尚坤, 陈文韬, 张文佳, 孙雨沁. 2018. 山东省东阿县单庄铁矿床地质特征及找矿前景[J]. 山东国土资源, 34(5): 74-80.
- 张艳飞, 郑国栋, 陈其慎, 陈小荣, 邢佳韵, 王琨, 阴秀琦, 覃升. 2021. 后疫情时期全球铁矿资源格局分析[J]. 地球学报, 42(2): 209-216.
- 张增奇, 李英平, 王怀洪, 刘兴旺. 2016. 山东省齐河禹城地区发现大型富铁矿[J]. 山东国土资源, 32(5): 94.
- 赵蕻, 谢兴友, 王士党, 纪晓阳. 2016. 综合物探方法在航磁查证中的应用——以济宁梁山东丁庄铁矿勘查为例[J]. 山东国土资源, 32(6): 71-74.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 李大新. 1986. 中国矽卡岩矿床基本地质特征[J]. 地球学报, 8(3): 59-87.
- YU Chang-ming, YE Jie. 2008. Comprehensive geophysical and geochemical prospecting method for concealed deposit localization prediction[J]. Nonferrous Mining and Metallurgy, 24(2): 2-7(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2016. Minerogenetic Series for Mineral Deposits: Discussion on Minerogenetic Series (V)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(5): 519-527.
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong. 2006. On minerogenetic (metallo-genetic) series: Third discussion[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1501-1508(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan. 1994. Metallogenic series of ore deposits[J]. Earth Sciences Frontiers, 1(3-4): 90-94(in Chinese with English abstract).
- DUAN Zhuang. 2019. The mineralization and mechanism of the iron skarn deposits in Laiwu district, Shandong Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan): 1-190(in Chinese with English abstract).
- FAN Ming-jing, XIAO Ke-yan, XU Yang. 2022. Development trend and progress of theories and methods for potential evaluation of global critical mineral resources[J]. Science Technology and Engineering, 22(1): 1-17(in Chinese with English abstract).
- GUO Yan-ming, HAO Xing-zhong, ZHONG Wei-jie, RU Liang, ZHAO Cheng-liang. 2017. Application of high precision magnetic measurement in exploration of hidden iron deposit: setting iron deposits in Litun area of Yucheng city in Shandong Province as an example[J]. Shandong Land and Resources, 33(10): 53-57(in Chinese with English abstract).
- HAN Liu. 2014. Genesis and Relationship with the Iron Mine of Ore-Bearing Rock Mass in Laiwu of Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing): 8-53(in Chinese with English abstract).
- HAN Run-sheng, ZHAO Dong. 2022. Research methods for the deep extension pattern of rock/ore-controlling structures of magmatic-hydrothermal ore deposits—a preliminary study[J]. Earth Science Frontiers, 29(5): 420-437(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, LI Hong-kui, LI Ying-ping, WANG Qiao-yun. 2017. Formation age of BIF iron ore deposit of Shanxian Area in Shandong Province- Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Dating[J]. Shandong Land and Resources, 33(3): 1-7(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, LI Hong-kui, PENG Guan-feng, WANG Qiao-yun, ZHI Yun-bao, ZHANG Hua-ping, ZHANG Chun-chi. 2022. Metallogenic prediction of BIF type iron deposit in hidden area in the western extension of Cangyi iron ore belt in western Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 38(3): 1-7(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, LI Ying-ping, YANG Yi-heng, WANG Ying-peng. 2014. Study on characteristics and prospecting direction of iron deposit in Shanxian coverage area in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 30(3): 56-61(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, LIU Wei, ZANG Kai, ZHANG Xue-song. 2018b. Primary study on metallogenic regularity of skarn type iron deposit in Pandian area in western Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 34(7): 27-33(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, WANG Qiao-yun. 2016. Metallogenic prospec-

References:

- AN Mao-guo. 2019. Study on metallogenic regularity and prospecting direction of Cangyi iron ore belt in Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-83(in Chinese with English abstract).
- CHEN Wei-jun, LIU Hong-tao, LIU Jian-ming, ZENG Qing-dong,

- tion of skarn type iron ore in the central and northern Luzhong uplift, east China[J]. *Journal of Geology*, 40(3): 443-449(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, YANG Yi-heng, LI Hong-kui, LI Ying-ping. 2018a. Proposal of “Yangzhuang type” iron ore and prediction model in Luxi area[J]. *Science Technology and Engineering*, 18(6): 65-72(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, YANG Yi-heng, LI Ying-ping, GAO Hua-li. 2013b. Prospecting model of the Cangyi iron metallogenic belt in Shandong Province, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1136-1142(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, YANG Yi-heng, LI Ying-ping, WANG Qiao-yun, WANG Ying-peng, WANG Li-gong. 2013a. Application of the integrated ore prognosis method in coverage area: a case study of Shanxian iron deposit in Shandong Province, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(2): 641-648(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, YANG Yi-heng, LI Ying-ping, WANG Qiao-yun. 2018d. Magnetic anomaly characteristics and iron ore prediction of Chengwu-Caoxian county area in Shandong Province, China[J]. *Progress in Geophysics*, 33(2): 613-619(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, YANG Yi-heng, LIU Wei. 2018c. Geological characteristics and prospecting significance of skarn type iron deposit in Pandian area, Shandong Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 18(20): 51-58(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, ZHENG Jin-ming, LIU Wei, WANG Run-sheng, WANG Qiao-yun, ZHANG Gui-li. 2020. Metallogenic prognosis of skarn-type iron ore deposits in Qihe-Yucheng area, Shandong Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 293-302(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong. 2014. Study on metallogenic regularities and prognosis of iron deposits in western Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- HUA Ren-min, MAO Jing-wen. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in east China[J]. *Mineral Deposits*, 18(4): 300-308(in Chinese with English abstract).
- HUANG Xu-zhao, FAN Zheng-guo, HE Jing-zi, GE Teng-fei, WANG Si-xun, MAN Yi, WANG Peng, LI Jun, WANG Heng. 2022. A collaborative airborne, ground, and borehole exploration technology system for concealed magmatic copper-nickel deposits[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(3): 597-607(in Chinese with English abstract).
- JIA Yi-qing, ZHANG Yan-fei, CHEN Xiao-rong, CHEN Qi-shen, LONG Tao, QI Gang, CHEN Sheng-li. 2021. Forecast of iron ore demand in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 217-222(in Chinese with English abstract).
- JIANG Biao, WANG Deng-hong, MA Yu-bo, PU Xiu-lang, LIU Jian-hong, FAN Xin-xiang, ZHAO Ji-chang, YE Hong-gang, HU Xiao-chun, CHEN Ye, XU Pei-bin, FAN Zong-fu. 2022. Main deposit types, new developments and new directions of prospecting in Beishan region and its adjacent areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(6): 2206-2216(in Chinese with English abstract).
- JIN Zi-liang. 2017. Genesis of high-grade Fe skarns: a case study of Zibo and Laiwu iron deposits in western Shandong[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-102(in Chinese with English abstract).
- KONG Qing-you, ZHANG Tian-zhen, YU Xue-feng, XU Jun-xiang, PAN Yuan-lin, LI Xian-shui. 2006. Deposits in Shandong province[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press: 291-346(in Chinese).
- LAI Xiao-dong, YANG Xiao-yong. 2012. Characteristics of the banded iron formation (BIF) and its Zircon chronology in Yangzhuang, western Shandong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3612-3622(in Chinese with English abstract).
- LAN Ting-guang, FAN Hong-rui, HU Fang-fang, YANG Kui-feng, ZHENG Xiao-li, ZHANG Hua-dong. 2012. Geological and geochemical characteristics of Paleoproterozoic Changyi banded iron formation deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3595-3611(in Chinese with English abstract).
- LANG Xing-hai, CUI Zhi-wei, WANG Xu-hui, DENG Yu-lin, XIE Fu-wei, HAN Peng, YANG Zong-yao, ZHANG Zhong, HUANG Yong, LI Zhi-jun, YIN Qing, ZHANG Jin-shu, DING Feng, DONG Shu-yi, WANG Zi-zheng, ZHANG Li. 2017. Comprehensive information prospecting model and target prediction for the Xiongkun area, Xietongmen county, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 790-802(in Chinese with English abstract).
- LI Hong-kui, GENG Ke, LI Yi-fan, ZHUO Chuan-yuan. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb age of Tongjing gold deposit in Yinan County, Shandong and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 497-503(in Chinese with English abstract).
- LI Hong-kui, HAO Xing-zhong. 2016. Study on metallogenic regularity of iron ore in Luxi area[M]. Beijing: Geological Publishing House: 156-173(in Chinese).
- LI Hou-min, CHEN Yu-chuan, LI Li-xing, WANG Deng-hong. 2012a. Metallogenic law of iron ore in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 142-182(in Chinese).
- LI Hou-min, WANG Deng-hong, LI Li-xing, CHEN Jing, YANG Xiu-qing, LIU Ming-jun. 2012a. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenetic units in China[J]. *Geology in China*, 39(3): 559-580(in Chinese with English abstract).
- LI Jun-jian, DANG Zhi-cai, PENG Yi, ZHANG Tong, SONG Li-jun, NI Zhen-ping, GUO Guo-hai. 2022. Preliminary Study on the iron resources and the metallogenic regularity in North China[J]. *North China Geology*, 45(1): 79-91(in Chinese with English abstract).
- MA Ji-yu. 2017. Summary of research on international trade of iron ore[J]. *China Mining*, 26(Sup.2): 102-107(in Chinese with English abstract).
- MA Ming, GAO Ji-lei. 2018. Discovery and characteristics of Sanchahe iron ore gold deposit in Laiwu city[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(10): 43-48(in Chinese with English abstract).
- NI Zhen-ping, TIAN Jing-xiang, WANG Lai-ming, LI Qing-ping. 2016. Metallogenic law of important mineral regions in Shandong Province[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press: 61-124(in Chinese).
- SHI Rui, ZHANG Ying-hui, LU Min-jie, KUANG Hai-yang, ZHANG Guo-li. 2018. 3D metallogenic prediction based on geological and gravity-magnetic data integration in the Qian'an iron ore concentration area, Hebei Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(6): 762-770(in Chinese with English abstract).

- SONG Ming-chun, JIAO Xiu-mei, ZHANG Cheng-ji, ZHANG Zeng-qi, HU Shu-ting, LI Shi-yong, LI Zhe, LI Pei-yuan. 2016. Stratigraphic sequence and tectonic setting of the Jining group in Shandong Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 40(1): 26-40(in Chinese with English abstract).
- SONG Ming-chun, WANG Pei-cheng. 2003. Regional geology of Shandong Province[M]. Jinan: Map Publishing House of Shandong: 1-356(in Chinese).
- WAN Yu-sheng, DONG Chun-yan, XIE Hang-qiang, WANG Shi-jin, SONG Min-chun, XU Zhong-yuan, WANG Shi-yan, ZHOU Hong-ying, MA Ming-zu, LIU Dun-Yi. 2012. Formation ages of early Precambrian BIFs in the north China craton: SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 86(9): 1447-1478(in Chinese with English abstract).
- WANG An-jian, GAO Xin-rui. 2020. China's energy and important mineral resources demand perspective[J]. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 35(3): 338-344(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang, CHEN Zheng-hui, SHEN Bao-feng, TANG Zhong-li, PEI Rong-fu. 2011. Advance in the study of mineralization system and its application to assessment of mineral resources[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(4): 385-395(in Chinese with English abstract).
- WANG Qing-song, ZHANG Jin-hui, ZHANG Shun-lin, ZHANG Jia-jia, CHAN Si-wei, CHENG Pei-sheng, CUI Xian-wen, ZHANG Kai. 2021. "Cycle asymptotic exploration technology system" and its application in thick overburden area[J]. *Geological Review*, 67(4): 1129-1146(in Chinese with English abstract).
- WANG Shi-jin, WAN Yu-sheng, ZHANG Cheng-ji, YANG En-xiu, SONG Zhi-yong, WANG Li-fa, WANG Jin-guang. 2009. Forming ages of early Precambrian metamorphic strata in Shandong Province: proofs of zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. *Shandong Land and Resources*, 25(10): 18-24(in Chinese with English abstract).
- WANG Wei, WANG Shi-jin, LIU Dun-yi, LI Pei-yuan, DONG Chun-yan, XIE Hang-qian, MA Ming-zhu, WAN Yu-sheng. 2010. Formation age of the Neoarchean Jining group (banded iron formation) in the western Shandong Province: constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1175-1181(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu-wang, XIE Hong-jing, SHI Yu, ZHOU Guo-chao. 2017. The comprehensive information prospecting geological model of contact metasomatic type rich iron ore in Qihe-Yucheng area, Shandong Province[R]. Beijing: Beijing Institute of Geology for Mineral Resources: 15-55(in Chinese).
- XIAO Ke-yan, CHENG Song-lin, LOU De-bo, SUN Li. 2010a. Comprehensive information evaluation model of regional mineral quantitative evaluation[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10): 1430-1444(in Chinese with English abstract).
- XIAO Ke-yan, LI Nan, WANG Kun, SUN Li, FAN Jian-fu, DING Jian-hua. 2015. Mineral resource evaluation under big data thinking[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(7): 1266-1272 (in Chinese with English abstract).
- XIAO Ke-yan, YE Tian-zhu, LI Jing-chao, YANG Yi-heng, DING Jian-hua, LOU De-bo. 2010b. Estimation method of comprehensive geological information of deposit model to predict resource amount[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10): 1404-1412(in Chinese with English abstract).
- XIE Cheng-xiang, LI Hou-min, WANG Rui-jiang, XIAO Ke-yan. 2009. Analysis of the quantity and distribution of the total identified iron resources in China and their supply capability[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(3): 387-394(in Chinese with English abstract).
- YANG Cheng-hai, XU Wen-liang, YANG De-bin, LIU Chang-chun, LIU Xiao-ming, HU Zhao-chu. 2005. Chronology of the Jinan gabbro in western Shandong: evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(4): 321-325(in Chinese with English abstract).
- YE Tian-zhu, LÜ Zhi-cheng, PANG Zhen-shan. 2014. The theory and method of prospecting and prediction in the exploration area(General Theory)[M]. Beijing: Geological Publishing House: 186-190(in Chinese).
- YE Tian-zhu, WEI Chang-shan, WANG Yu-wang, ZHU Xin-you, PANG Zhen-shan. 2017. The theory and method of prospecting and prediction in the exploration area (Each Theory)[M]. Beijing: Geological Publishing House: 319-356(in Chinese).
- YU Xue-feng, ZHANG Tian-zhen, WANG Hong. 2015. Metallogenic series of Shandong deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House: 13-631(in Chinese).
- ZENG Guang-xiang, LÜ Chang, XU Jin-fang. 1998. Shandong iron ore geology[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press: 49-84(in Chinese).
- ZHANG Yan, ZHANG Shang-kun, CHEN Wen-tao, ZHANG Wen-jia, SUN Yu-qin. 2018. Geological characteristics and prospecting prospects of Shanzhuang iron deposit in Dong'e County, Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(5): 74-80(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yan-fei, ZHENG Guo-dong, CHEN Qi-shen, CHEN Xiao-rong, XING Jia-yun, WANG Kun, YIN Xiu-qi, QIN Sheng. 2021. An analysis of global iron ore resource market trend in the post-COVID-19 period[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 209-216(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zeng-qi, LI Ying-ping, WANG Huai-hong, LIU Xing-wang. 2016. The discovery of large type rich iron ore in Yucheng-Qihe area, Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 32(5): 94(in Chinese).
- ZHAO Hong, XIE Xing-you, WANG Shi-dang, JI Xiao-yang. 2016. Application of comprehensive geophysical exploration in aeromagnetic anomaly area—setting Dongdingzhuang iron deposit in Liangshan county in Jining city as an example[J]. *Shandong Land and Resources*, 32(6): 71-74(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yi-ming, LIN Wen-wei, BI Cheng-si, LI Da-xin. 1986. Basic geological characteristics of Skarn deposits in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 8(3): 59-87(in Chinese with English abstract).