山东莱芜铁矿田矿体保存变化兼论地壳升降 特征

陈 莉^{1,2,3}, 李洪奎^{1,2,3}, 孙建文⁴, 陈 勇⁴, 韩学林^{1,2,3}

¹山东省地质科学研究院,山东 济南 ²自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室,山东 济南 ³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 ⁴山东省核工业二四八地质大队,山东 青岛 Email: lhklhk126@126.com

收稿日期: 2021年1月19日; 录用日期: 2021年2月16日; 发布日期: 2021年2月23日

摘要

莱芜铁矿田是山东鲁西地区著名的接触交代矽卡岩型铁矿田,前人对莱芜矽卡岩型铁矿成矿规律进行了系统总结,但对莱芜铁矿田成矿后剥蚀保存的研究很少。本文运用源-运-储-变-保成矿系统论理论,以 莱芜铁矿田内矿床的保存剥蚀现状为依据,研究发现莱芜铁矿田内矿体的保存及剥蚀强度较大,同时也为 研究该地区地壳升降运动提供了资料支撑。研究表明:莱芜铁矿田是受早古生代碳酸盐岩地层、中生代中 基性侵入岩和接触带构造三位一体控制的接触交代矽卡岩型铁矿,其形成后矿床遭受了不同程度的风化剥 蚀,按照剥蚀程度不同可分为强剥蚀矿床、轻微剥蚀矿床和未剥蚀矿床,铁矿类型以原生铁矿床为主,砾 岩型铁矿则占比较少。根据莱芜铁矿田内矿体形成的深度与成矿母岩的侵位深度是大体一致的客观事实, 结合莱芜铁矿田成矿母岩岩石化学指数间接判断其侵入深度和剥蚀深度,依据沉积层区域厚度和钻孔揭露 的残存地层厚度估算,莱芜中基性侵入岩的侵位深度应在4000~7000 m,其剥蚀深度应在3000~5000 m; 铁矿体形成深度略浅于岩体侵位深度,大致在3900~5000 m范围内,而剥蚀深度基本在4000~5000 m。根 据莱芜地区侵入岩和矽卡岩铁矿形成时代为130 Ma的事实,研究区内岩体侵位和矿体形成的环境演化过程 大致经历了地壳持续抬升隆起阶段、强烈风化剥蚀阶段、地壳下降沉积阶段、地壳缓慢隆升期和现今的矿 岩保存现状5个阶段,初步估算区内地壳的上升速率大约0.064 mm/a,而剥蚀速率大约0.033 mm/a,说明 区内经历了快速隆升和较缓慢剥蚀的复杂过程,为研究区域地壳升降和区内铁矿的保存提供了佐证。

关键词

铁矿体,岩体侵位,剥蚀保存,地壳升降,莱芜铁矿田

Preservation Changes of Ore Bodies and the Characteristics of Crustal Rise and Fall in Laiwu Iron Field, Shandong Province

Li Chen^{1,2,3}, Hongkui Li^{1,2,3}, Jianwen Sun⁴, Yong Chen⁴, Xuelin Han^{1,2,3}

¹Shandong Geological Sciences Institute, Jinan Shandong

²Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Natural Resources, Jinan Shandong

³Shandong Key Laboratory of Geological Processes and Resource Utilization in Metallic Minerals, Jinan Shandong ⁴No. 248 Geological Brigade of Shandong Nuclear Industry, Qingdao Shandong

Email: lhklhk126@126.com

Received: Jan. 19th, 2021; accepted: Feb. 16th, 2021; published: Feb. 23rd, 2021

Abstract

The Laiwu iron field is a famous contact metasomatic skarn iron field in the Luxi area of Shandong Province. Previous studies have systematically summarized the mineralization regularity of Laiwu skarn type iron ore, but there are few studies on the denudation and preservation after mineralization of Laiwu iron ore field. Based on the present situation of deposit preservation and denudation in the Laiwu Iron Mine Field, this paper uses the theory of sources-moving-reserviors-metamorphosepreserving metallogenic system. It is found that the preservation and denudation intensity of ore bodies in the Laiwu Iron Mine Field is relatively high, which also provides data support for the study of crustal up-and-down movement in this area. Research shows that: Laiwu iron ore field is influenced by early Paleozoic carbonate formation, basic in the Mesozoic intrusive rocks and contact zone controlled the trinity of contact metasomatic skarn type iron ore. After its formation, the deposit suffered different degrees of weathering stripping the corrosion. According to different denudation degrees, it can be divided into strong denudation deposits, slight denudation deposits and non-denudation deposits. The main iron ore types are Proto-pig iron deposits, while the conglomerate iron ore types are relatively less. According to Laiwu iron ore field in the depth of the formation and the ore-forming mother rock ore bodies emplacement depth is generally consistent objective facts, combining with Laiwu iron ore field ore-forming parent rock geochemistry index indirectly judging its invasion depth and denudation depth. According to the regional thickness of sedimentary layers and the residual strata thickness revealed by boreholes, the emplacement depth of Laiwu intermediate basic intrusive rocks should be 4000~7000 m, and its denudation depth should be 3000~5000 m; The formation depth of iron ore body is slightly lower than the emplacement depth of rock mass, roughly in the range of 3900~5000 m, while the denudation depth is basically in the range of 4000~5000 m. According to Laiwu region intrusive rocks and skarn ore forming age of 130 Ma-the fact that in the emplacement and rock ore forming environment roughly experienced the evolution process of the earth's crust uplift stage, strongly weathering erosion stage, the earth's crust drop sedimentary stage, crustal uplift and the features of today's status quo five stages, the preliminary estimate in the earth's crust rise rate is about 0.064 mm/a, and erosion rate is about 0.033 mm/a, zone has experienced rapid uplift and denudation of slower complex process. It provides evidence for the study of regional crustal uplift and the preservation of iron ore in the area.

Keywords

The Iron Ore Body, Rock Emplacement, Denudation Preservation, Crustal Lifting, Laiwu Iron Ore Field

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

1. 引言

莱芜铁矿田是山东鲁西地区著名的接触交代矽卡岩型铁矿田,其矿石以富铁矿为主。富铁矿是指含铁量在 50%以上铁矿石,是我国紧缺的战略性矿产资源,在国民经济中占有重要的战略地位。山东省是我国 富铁矿的重要来源,约占全国富铁矿总量的 46%,莱芜铁矿田中富铁矿总量占山东的 67.32%,足见莱芜铁 矿田在富铁矿中所占的地位。对于莱芜铁矿田的成矿地质条件[1] [2]、铁矿成因和成矿规律研究等方面也取 得了一系列重要进展[3]-[10],李洪奎[11] [12]、郝兴中[13] [14] [15]对莱芜矽卡岩型铁矿进行了成矿规律进 行了系统总结,杨承海[16] [17]、韩鎏[18]等对莱芜岩体及铁矿的形成时代进行研究,戴广凯[19]、杨恩秀 [20]等从区域角度研究了泰莱盆地的地壳升降变化,但前人对莱芜铁矿田成矿后剥蚀的研究很少涉猎。翟 裕生[21]在论述成矿系统源 - 运 - 储 - 变 - 保五要素时强调,在一定地质时 - 空域中控制矿床形成、变化、 保存的全部地质要素和成矿作用动力过程是具有成矿功能的自然系统,前三者为成矿系统,后二者为保矿 系统,可见矿床的保存系统是十分重要的。有资料表明:在莱芜铁矿田已探明的铁矿床中,矿体的剥蚀是 非常强烈的,这既破坏了矿体的连续性,又减少了铁矿资源量。因此矿体形成后有利的保存条件不仅是构 成矿的重要前提,也是研究地壳升降变化的有利参照物。本文是在进行山东富铁矿构造环境和成矿规律课 题研究时,发现莱芜铁矿田内矿体的保存及剥蚀强度较大,同时也是该地区地壳升降的一个缩影。探讨铁 矿体的保存条件,既有利于研究矿床的找寻方向,同时也为研究该地区自铁矿形成后地壳演化提供佐证。

2. 区域背景及矿床地质特征

2.1. 区域成矿地质背景

2.1.1. 构造环境

莱芜铁矿田产于泰(安)莱(芜)凹陷(V)与新甫山凸起(V)和鲁山凸起(V)的三个五级构造单元交界处,断陷盆地的控边断裂具有切割深、活动期长的特点,并诱导了上地幔玄武质岩浆上升侵位、分异结晶,演化成基性-中性-酸性侵入岩建造组合[12],岩性为辉长岩、闪长岩、二长岩及花岗闪长岩,这些侵入岩与古生代碳酸盐岩、尤其是与奥陶纪五阳山组、阁庄组、八陡组碳酸盐岩接触交代而在构造有利空间形成矽卡岩型铁矿床。

2.1.2. 矿田地质

泰莱盆地北部、东部、南部分别受北东向断裂、北西向断裂和近东西向断裂控制。北东向、北西向 断裂和近东西向断裂均为燕山期构造运动所形成,其特点是由二组脆性断裂形成牵引"入"字形弧状构 造体系(图 1)。北东向者为盆地北部的泰安 - 大王庄断裂,北西向者为盆地东部的铜冶店 - 孙祖断裂,近 东西向者为盆地南部的石门官庄 - 塔子断裂,三条断裂为控制盆地的主干断裂[22],此外尚有多组次级断 裂, 使盆地内构造格架复杂化。

矿田内地层自下而上划分为新太古代泰山岩群、古生代寒武纪长清群、寒武 - 奥陶纪九龙群、奥陶 纪马家沟群、石炭纪 - 二叠纪月门沟群、石盒子群,中生代侏罗纪淄博群、白垩纪莱阳群、青山群,新 生代古近纪官庄群、新近纪临朐群和第四纪松散堆积物。

矿田内岩浆岩形成时代主要为新太古代和中生代,新太古代岩浆岩主要有傲徕山序列蒋峪单元条带 状中粒黑云二长花岗岩、邱子峪单元巨斑状细粒含黑云二长花岗岩、松山单元中粒二长花岗岩和调军顶 单元细粒二长花岗岩。

中生代燕山期侵入岩岩石类型以中性的闪长岩类为主,莱芜岩体从西向东分为崅峪、金牛山、矿山、 铁铜沟四个岩体,主要岩石类型有:角闪辉长岩、角闪闪长岩、辉石闪长岩、二辉闪长岩、角闪闪长玢 岩、角闪石英闪长岩、二长闪长岩等,与成矿关系最密切的是闪长岩类,这是最重要的成矿母岩,为一 套幔源岩浆演化系列的基性-中性岩石组合的杂岩体。



Figure 1. Regional geological and mineral map of Laiwu iron field. 1-Quaternary system; 2-Paleogene; 3-Cretaceous;
4-Jurassic; 5-Permian; 6-Carboniferous; 7-Ordovician; 8-Cambrian; 9-Neoarchean; 10-Basalt; 11-Diorite; 12-Fault;
13-Anticlines and synclines; 14-Large iron ore; 15-Medium iron ore; 16-Small iron ore
图 1. 莱芜铁矿田区域地质矿产略图。1-第四系; 2-古近系; 3-白垩系; 4-侏罗系; 5-二叠系; 6-石炭系; 7-奥陶系; 8-寒武系; 9-新太古界; 10-玄武岩; 11-闪长岩; 12-断层; 13-背斜和向斜; 14-大型铁矿; 15-中型铁矿; 16-小型铁矿

2.2. 矿床地质特征

莱芜铁矿田是典型的与中基性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿,矿石品位富、储量大、是国内重要的富铁矿基地之一[23],经过40多年的地质工作,区内共查明大中小型铁矿床27处,资源储量6.2亿吨,所查明矿体均分布在岩体与围岩接触带及其附近。根据接触带的倾向、倾角及接触带的位置和复杂程度,将矿床分为单斜的、褶皱的、缓倾的、陡倾的、简单的和复杂的若干产状类型,此类矿体多呈透镜状、囊状、不规则状、脉状、马鞍状、糖葫芦状等产出,受接触带空间制约;按照矿体赋存的空间和构造特征分为:不(假)整合面上的矿体、围岩层间裂隙矿体、正接触带矿体和岩体内矿体,其中加里东构造不整合面是区内交代型铁矿的重要赋矿构造。该类矿体形态多呈似层状、薄板状、透镜状、串珠状、豆荚状、脉状等。矿体长宽变化大,一般来说矿体长35~1500 m,倾斜延深 60~1420 m,矿体厚度变化较大,1.56~122.62 m,厚度变化系数102%~110%,矿体形态复杂程度为复杂。TFe 品位21.86%~67.16%,平均46.68%,品位变化系数33.20%,有用组分分布均匀。总体上矿体规模变化大是矽卡岩型矿床的主要特点。

3. 矿体保存特征

众所周知,莱芜铁矿田形成的必要和充分条件是:地层、构造、岩浆岩三位一体的有机耦合,三者耦 合关联、相互作用、互为因果、缺一不可,即有中生代中基性侵入岩、古生代厚层状钙镁质碳酸盐岩、区 域性控制断陷盆地的边界深大断裂及次级控容矿构造,其中与成矿有关的中基性岩浆岩控制了铁矿的形成 深度和成矿时代,古生代碳酸盐岩层间构造尤其是加里东不整合面及接触带构造控制了矿床规模。莱芜铁 矿田内的矿体形成与岩体的紧密相关,中基性岩体的侵位深度与与矽卡岩型铁矿的形成深度大致相同,铁 矿产出和分布规律总体上表现为:铁矿围着岩体转、矿体沿着构造成是接触交代矽卡岩型铁矿的突出特点。

3.1. 矿体保存剥蚀现状

莱芜铁矿田目前已查明了 27 处大、中、小型铁矿床,对其中 23 处铁矿床赋存标高、剥蚀程度和下 沉后覆盖层厚度等情况进行了统计(见表 1)。资料显示:铁矿床赋存标高在 270~-810 m 之间,其垂直空 间在 1080 m,单矿体最大垂深 570 m,基本代表了莱芜铁矿田成矿的垂向空间范围。矿体剥蚀程度强烈 者的有 3 处,已遭受剥蚀的有 12 处,未受到剥蚀的 8 处,总体上遭受剥蚀的矿体占 65.22%,说明大部 分矿体均受到不同程度的剥蚀,当然矿体剥蚀殆尽者已无法计算。

Table 1. Statistical table of denudation degree of ore body in Laiwu iron mine 表 1. 莱芜铁矿田矿体剥蚀程度统计表

矿床名称	产出位置	赋存标高(m)	距地表(m)	距古近系底界(m)	剥蚀程度	备注
张家洼I矿床	矿山弧形背斜北倾 伏端东侧	-240~-810 m	460 m	矿体顶部处于界面	刚受到剥蚀	
张家洼II矿床	矿山弧形背斜北倾 伏端西侧	-250~-360m	450 m	矿体顶部处于古近系界面之下	遭受强烈剥蚀, 保留2/5	
张家洼Ⅲ矿床	矿山弧形背斜北倾伏 端	-150~-630m	440 m	0 m, 在不整合面之下, 古近系埋深480~440m	刚刚受到剥蚀	
顾家台矿床	矿山弧形背斜转折处	-200~-570m	410 m	10 m, 在不整合面之下, 古近系埋深450~430 m	未受到剥蚀	
赵庄矿床	矿山弧形背斜 纵弯处西侧	120~-30m	120 m	50~80 m	未剥蚀	
杜官庄矿床	矿山弧形背斜南 倾伏端	-250~-350m	467 m	150 m	未剥蚀	
业家庄矿床	矿山弧形背斜南 东侧倾伏端	25~-150m	200 m	0 m	刚刚受到剥蚀	
马庄矿床	矿山弧形背斜 纵弯处东侧	200~-200m	0 m	0 m	刚刚受到剥蚀	地表矿
曹村矿床	矿山弧形背斜 纵弯处内侧	180~-100m	50 m	0 m	刚刚剥蚀出矿体头	
垂阳铁矿	加里东不整合面	-250~-350m	467 m	150 m	未剥蚀	
西泉河矿床	奧陶系八陡组层间 构造中,呈似层状	40~-50m	175 m	80 m	未剥蚀	
山子后矿床	矿山弧形背斜纵弯 褶皱处东侧	-130~-540m	300 m	130 m	未剥蚀	
姚家岭矿床	矿山弧形背斜纵弯 褶皱内侧	-50~-300m	250 m	未见古近系, 地表出露闪长岩	未剥蚀	
西尚庄矿床	矿山弧形背斜西侧	-50~-330m	270 m	古近系220~-110 m	未剥蚀	
崔家庄矿床	金牛山岩体接触带	240~180m	0 m	未见到古近系, 地表出露大理岩	已剥蚀剩矿尾	地表矿
下水河矿床	金牛山岩体接触带	240~50m	0 m	未见古近系, 地表出露闪长岩	己剥蚀	地表矿
温石埠南矿床	金牛山岩体接触带	175~90m	27 m	未见古近系, 第四系之下为矿体	己剥蚀	

Continued						
温石埠北矿床	金牛山岩体内、 外接触带	180~-185m	32 m	未见古近系, 第四系下为矿化体	剥蚀临界线	
毛圈矿床	金牛山岩体接触带	250~130m	0 m	矿体直接出露地表	已剥蚀	地表矿
陈林矿床	金牛山岩体接触带	260~200m	0 m	矿体直接出露地表	已剥蚀	地表矿
崅峪矿床	崅峪岩体接触带	140~0m	50 m	无古近系	未剥蚀	
唐庄矿床	崅峪岩体接触带	143~-32m	4 m	无古近系	已剥蚀, 第四系下4米为矿体	地表矿
铁铜沟矿床	铁铜沟岩体接触带	270~150m	0 m	无古近系	刚刚受到剥蚀	地表矿

矿体剥蚀之后接受了古近纪沉积,可分为二种情况:一是古近系直接覆盖于矿体之上,二是古近系 覆盖于早古生界碳酸盐岩之上,其古近系厚度在 50~900 m 之间,其上覆第四系厚度在 0.5~6 m 不等。

3.2. 矿体剥蚀程度分析

从表 1 中可以看出, 矿体剥蚀情况差异较大, 如前述, 矿体剥蚀程度可分为强剥蚀矿床、轻微剥蚀 矿床和未剥蚀矿床, 已剥蚀殆尽矿床已无可靠证据, 故在此处不讨论。



1) 强剥蚀矿床

Figure 2. Laiwu zhangjiawa depression II deposit rise after strong denudation recovery figure (According to the shandong province laiwu zhangjiawa depression II ore deposit geological exploration report, 1977, adaptation) 1-Paleogene Changlu Formation; 2-Marble; 3-Iron ore body; 4-Skarn; 5-Alterated serpentinite; 6-Early Cretaceous diorite; 7- Denudation line and presumed denudated ore body

图 2. 莱芜张家洼 II 矿床抬升遭受强烈剥蚀复原图(据山东省莱芜张家洼铁矿 II 矿床地质勘探报告, 1977, 改编)。 1-古近系常路组; 2-大理岩; 3-铁矿体; 4-矽卡岩; 5-蚀变蛇纹岩; 6-早白垩世闪长岩; 7-剥蚀线及推测被剥蚀的 矿体 强剥蚀的矿床有口镇矿床、张家洼 II 矿床、崔家庄矿床和唐庄矿床等,这些矿床矿体已剥蚀过半或 仅剩矿体尾部,有的仅剩尾部矿体的残留,如莱芜口镇一处矿体己完全剥蚀,仅发现有3米厚的矿体残 留,在古近系砾岩中有磁铁矿的砾石,并引起较强的磁异常,经钻探验证为矿体剥蚀异常所致。张家洼 II 矿床8勘探线剖面图清楚的显示(图2),该矿体大部已被剥蚀,从复原的矿体形态分析,被剥蚀掉的矿 体约占完整矿体总量的二分之一强,但在后期的构造活动该区地壳开始下沉,接受了古近纪官庄群的沉 积,使官庄群覆盖在矿体之上后才免遭矿体继续受到剥蚀得以保存。张家洼 II 矿床 12 勘探线剖面图则显 示原生矿体、残坡积矿体和经短距离搬运的砾岩矿体共存(图3),展示了该剖面上铁矿体的风化、剥蚀、 搬运、沉积的完整过程。ZK12-4、ZK12-6、ZK12-7、ZK12-8 揭露的铁矿体遭受强烈剥蚀,并在原生矿 体之上存留有经风化后原地、半原地沉积的磁铁矿砾岩,构成残积砾岩型铁矿体,其砾岩型铁矿厚度在 1.12~3.5 m,说明残积砾岩铁矿体具有一定的厚度规模,同时反证了风化剥蚀具有相当长的时间历史。在 ZK12-1、ZK12-5、ZK12-5、ZK12-9、ZK12-10和ZK12-14 孔均揭露了经短距离搬运的沉积砾岩型铁矿 体,其中 ZK12-1、ZK12-5 孔砾岩矿体直接沉积在石炭系本溪组泥质岩、砂质碎屑岩之上,ZK12-10、 ZK12-14 则为在不整合面之上首先沉积了古近系官庄群含砾石砂岩、砾岩、砂砾岩沉积,在砂砾岩之上 又沉积了厚 2.15 m的磁铁矿砾岩矿体,说明是在风化剥蚀过程中先沉积了残坡积覆盖砾岩层,之后又沉 积了砾岩型铁矿,这指示了矿体是经历长期风化剥蚀并原地、半原地或短距离搬运沉积的过程。



Figure 3. Laiwu zhangjiawa depression II deposit prospecting line section 12, ore body in denudation, breccia type ore body distribution (According to the Shandong province Laiwu zhangjiawa depression II ore deposit geological exploration report, 1977, adaptation) 1-Gravel bearing sandstone; 2-Conglomerate; 3-Magnetite bearing gravel conglomerate; 4-Conglomerate iron ore; 5-Sandy shale; 6-Clay shale; 7-Clay SLATE; 8-Serpentine marble; 9-Serpentine marble containing magnetite; 10-Diopside skarn; 11-Magnetite orebody; 12-Diorite porphyrite; 13-Diorite; 14-Biotite diorite; 15-Syenodiorite; 16-Porphyritic diorite; 17-Diopside fossilized porphyritic diorite; 18-Diopside diorite; 19-Structural fracture zone; 20-Fault and serial number; 21-Drilling location, drilling number/orifice elevation (m); 22-Azimuth of profile line, position and number of baseline pile; 23-Magnetic anomaly curve

图 3. 莱芜张家洼 II 矿床 12 勘探线剖面图,示矿体剥蚀、砾岩型矿体分布(据山东省莱芜张家洼铁矿 II 矿床地质勘探 报告,1977,改编)。1-含砾石砂岩;2-砾岩;3-含磁铁矿砾石砾岩;4-砾岩铁矿;5-砂质页岩;6-粘土页岩;7-粘板岩; 8-蛇纹石化大理岩;9-含磁铁矿蛇纹石化大理岩;10-透辉石矽卡岩;11-磁铁矿矿体;12-闪长玢岩;13-闪长岩;14-黑云母闪长岩;15-正长闪长岩;16-似斑状闪长岩;17-透辉石化似斑状闪长岩;18-透辉石化闪长岩;19-构造破碎带; 20-断层及编号;21-钻孔位置、钻孔编号/孔口标高(m);22-剖面线方位角、基线桩位置及编号;23-磁异常曲线

再如莱芜崔家庄铁矿床,第7勘探线剖面图显示,其上部已大部分被剥蚀,铁矿体与含矿的矽卡岩 及奥陶纪马家沟群五阳山组直接与古近系相接触,证明矿体及围岩已遭受到严重的剥蚀。

2) 轻微剥蚀矿体

莱芜铁矿田内轻微剥蚀矿床有张家洼 I 矿床、张家洼 III 矿床、业家庄矿床、马庄矿床、曹村矿床、 下水河矿床、温石埠南矿床、温石埠北矿床、毛圈矿床、陈林矿床、唐庄矿床、铁铜沟矿床,这些矿床 基本上刚刚遭受剥蚀,但剥蚀程度有所不同,有的刚剥蚀到矿体顶部,有的则剥蚀去了矿体头顶,有的 则在矿体剥蚀的临界点上直接被第四系所覆,详见表1之说明,此不赘述。

3) 未剥蚀矿床

区内未剥蚀矿床包括顾家台矿床、赵庄矿床、杜官庄矿床、垂阳铁矿、西泉河矿床、山子后矿床、 姚家岭矿床、西尚庄矿床和崅峪矿床,这些铁矿床产出构造环境主要体现在四个方面:一是产于奥陶纪 与石炭 - 二叠纪之间的加里东构造不整合面上或其附近;二是产于奥陶纪岩层之间的层间构造面中;三 是产于闪长岩与奥陶纪马家沟碳酸盐岩的接触带上,主要位于接触带围岩一侧,透辉石砂卡岩、石榴石 矽卡岩和矽卡岩化闪长岩等与铁矿成矿关系密切,并常伴生有铜、钴、金等矿产;四是产于闪长岩中或 闪长岩中大理岩包体边部,也可以说此岩体内矽卡岩型铁矿的一种特例。

4. 地壳升降幅度估算

根据岩浆矿床成矿特点及规律,尤其是高温岩浆矽卡岩型铁矿,矿体形成的深度与成矿母岩的侵位 深度是大体一致的,即岩浆侵入深度就是矿体形成深度。客观上当矿床形成并被抬升到地表一定深度时, 达到在当前经济条件下能够开采者则为矿。最理想的矿床是形成于一定深度被刚刚抬升到地表尚未被剥 蚀的矿床,但由于一些矿床受到强烈剥蚀或剥蚀殆尽时也失去矿床的意义。

为了讨论地壳升降幅度的变化,鉴于岩浆侵位深度与铁矿形成深度具有成生联系,本文将岩体侵位 深度与铁矿床形成深度作为参照物一起进行论述。

4.1. 岩体侵位深度与剥蚀深度

4.1.1. 岩体侵位深度

地壳深处的岩浆,具有很高的温度,遭受很大的压力,当地壳运动出现破裂带时,局部压力降低, 岩浆向压力降低的方向运移,沿着破裂带上升,侵入到地壳内,在深处结晶和冷凝而形成侵入岩。根据 侵入体三维空间形态划分为岩盖、岩盆、岩床、岩鞍、岩墙等,与岩基或岩株直接相连的脉状侵入体称 为岩枝。结合岩石学研究成果,将侵入岩划分为深成相(>10 km, catazone)、中深成相(10~3 km, mesozone) 和浅成相[24] (<3 km, epizone),其大致确定岩浆侵位深度(表 2)。

同时岩石化学指数除了可以判别岩石属性外,还可以间接判断其侵入深度和剥蚀深度[24]。Peacock 碱钙指数、Rittmann 组合指数和 Wright 碱度率这三个化学指数反映岩体的结晶分异特点。Rittmann 用组 合指数(σ)定量表述,其优点是单个样品即可确定其σ值,而 Peacock 指数需要一个岩石谱系大量的样品才 能确定该指数的数值;另外一个优点是依据单个样品的σ值可更好地考察一个岩石谱系的σ变异趋势,而 Peacock 指数获得的则是一个岩石谱系的一个平均值。Wright (1969)为克服 Rittmann 组合指数用于花岗岩 - 流纹岩类无效的缺点,提出用碱度率(A.R)来定量地表征[24],需要强调的是,在 SiO₂ 含量相等的条件 下,依碱度率的增加划分出三个组,即 calc-alkaline (+tholeiitic); alkaline 和 peralkaline (+strongly alkaline)。 而 SI 小,则分异程度高; DI 越大,说明岩浆分离结晶作用越强烈,莱芜岩体的岩石化学参数见表 3 所示。

从表 3 中可以看出: 莱芜岩体的 σ (里特曼指数)为 2.91~4.2, A.R (碱度率) 1.71~2.05, A/CNK (过铝 指数) 0.60~0.76, 属于偏铝质钙碱性岩石; DI (分异指数) 54.86~61.57, SI (固结指数) 26.09~53.5, FL (长 英质指数) 42.57~55.19, 反应岩石分离结晶程度中等,分异较差; OX (氧化率)0.59~0.61,表明岩浆侵位 中等。据此说明莱芜岩体侵位中等、结晶分异作用不完全,属中深成相,侵位深度在 3000~10,000 m 范 围内,结合区域地质特点,从经验地质学的理论推断,莱芜岩体的侵位深度应在 4000~7000 m 的范围。 Table 2. List of emplacement depth markers of intrusive rocks (According to Ye Tianzhu *et al.*, 2010) 表 2. 侵入岩侵位深度标志一览表(据叶天竺等修改, 2010)

	浅成相	中深成相	深成相	
侵位深度	<3 km	3~10 km	>10 km	
岩石学特征	岩体具细粒、隐晶质结构及斑状结 构, 斑晶可具熔蚀或暗化边结构。矿 物常保存了高温条件下的结构状态, 斜长石环带发育、常见高温石英斑 晶、出现易变辉石等。	岩石具中粒、中粗粒结构、似斑状结构, 岩体组成一般不均匀,矿物内部的结构状 态在缓慢冷却过程中得到调整,如斜长石 环带不发育,石英为它形的低温石英。	岩体常为片麻状构造, 交代结 构十分发育。斜长石无环带。	
侵入体产状	侵入体规模较小,常见岩墙、岩床、 岩盖、小岩株、隐爆角砾岩体等,岩 体中可以发现晶洞构造,与围岩多呈 不整合接触。	多属较大的侵入体,如岩株、岩基、岩盆 等,也有岩盖、岩墙等小型侵入体。	岩体较大,岩体走向与区域构 造线理方向一致,围岩为区域 变质的结晶片岩、片麻岩类, 岩体主要为花岗岩类。	
与围岩 接触关系	岩体接触变质较弱,有时有硅化、绿 泥石化、绢云母化蚀变,浅成相小型 侵入体常与金属矿产有关,尤其是隐 爆角砾岩体,是很好的容矿岩体。	接触变质带较宽,有时有云英岩化带,常 见矽卡岩带,在接触带可形成各种接触变 质和高温汽成热液矿床。	岩体无冷凝边,围岩无接触变 质带,与围岩多为逐渐过渡关 系。	

Table 3. List of petrochemical parameters of Laiwu rock mass 表 3. 莱芜岩体岩石化学参数一览表

山子米刊	岩石化学参数								
石口尖型	σ	A.R	DI	SI	FL	M/F	Ox	A/NKC	
二长闪长岩	4.17	3.11	82.62	13.06	80.47	1.24	0.52	0.90	
	2.88	2.23	70.76	20.92	64.84	1.65	0.57	0.87	
	4.0	2.54	74.02	16.42	69.38	1.17	0.55	0.82	
角闪石英闪长岩	4.5	2.72	75.83	13.86	74.06	0.93	0.54	0.88	
	4.83	2.33	75.86	16.29	62.28	1.87	0.53	0.691	
	3.11	2.36	69.08	27.32	64.16	2.18	0.57	0.77	
	2.55	2.24	71.4	27.37	73.77	1.86	0.51	1.01	
用闪闪飞切石	3.37	2.18	64.72	33.25	62.51	2.62	0.52	0.77	
	2.23	1.69	52.18	32.75	46.9	1.89	0.63	0.79	
角闪闪长岩	4.3	2.38	65.01	24	67.52	1.39	0.57	0.85	
	3.27	1.93	60.41	28.84	50.37	2.56	0.58	0.67	
	2.91	1.71	57.25	35.5	42.57	4.56	0.61	0.60	
要プ句と再	3.53	1.98	56.7	32.23	54.63	2.15	0.6	0.75	
冲口内下石	4.18	2.05	61.57	26.09	55.19	1.39	0.59	0.67	
	4.2	1.95	54.86	26.58	52.98	1.36	0.6	0.72	

4.1.2. 岩体剥蚀深度

如上述,莱芜岩体在 4000~7000m 的范围冷凝结晶后,由于地壳发生构造运动,引起地壳结构改变、 地壳内部物质变位并形成差异性升降。在同一地质时期内,地壳在某一地区表现为上升隆起,而在相邻 地区则表现为下降沉陷,隆起区与沉降区相间分布,此起彼伏、相互更替。根据侵入体出露情况、岩石 学特征、围岩蚀变、围岩捕虏体等确定侵入岩剥蚀深度(表 4)。从莱芜岩体目前的分布情况看,其剥蚀程 度已达岩体的外部-内部相,即浅、中及深剥蚀区,据此推测,莱芜岩体已剥蚀深度各地不等,再加上 上覆覆盖层,其剥蚀深度应在 3000~5000 m 左右,因为莱芜岩体均受到不同程度的剥蚀,矿山岩体已大 面积出露,岩性相对简单,表明其剥蚀较深。

 Table 4. Marks of denudation depth of intrusive rocks

 表 4. 侵入岩剥蚀深度标志

未剥蚀	浅剥蚀	中等剥蚀	深剥蚀
地表看不到侵入体,但可	有侵入体出露,岩体中有时可见围岩顶	侵入体出露面积较大,极少见	侵入岩大面积出露,没有明显的接
见围岩蚀变晕圈、交代作	垂体或大型捕虏体, 岩石结构较细, 有	围岩捕虏体, 岩石结构较粗,	触变质现象, 岩石结构粗, 岩性相
用和矿化现象等。	时可见接触变质和矿化现象。	成分单元和结构单元复杂。	对简单,同侵入脉岩发育。

4.2. 矿体形成深度与剥蚀深度

当矿体形成以后,如果成矿环境发生改变,尤其是地壳发生整体性的抬升或下降,则矿体会随之会 出现抬升或下降的变化。区域性的构造抬升对矿体的保存大致有二种情况,一是构造抬升将深部的矿体 抬升到浅层地表且不被剥蚀,这有利于矿床的开发利用;二是持续的抬升剥蚀作用则使矿体大部分或全 部被剥蚀殆尽或者仅保存了矿体的根部部分,还有介于此二种特例的其它情况,此不一一叙述。

4.2.1. 矿体形成深度

由于接触交代砂卡岩型铁矿与中基性岩浆的成因关系,可以认为岩浆侵位深度基本等同于铁矿形成 深度。前已述及,莱芜铁矿田内中基性岩体的侵位深度在 4000~7000 m 的范围内,考虑到铁矿多产于岩体的顶部及两侧与碳酸盐岩接触交代部位,或产于岩体中,推测其形成深度略浅于岩体侵位深度,大致 在 3900~5000 m 范围内。

4.2.2. 矿体剥蚀深度

对莱芜铁矿田 23 处铁矿床剥蚀程度统计(表 1)显示:遭受剥蚀的铁矿床占 65.22%,强烈剥蚀的铁矿床占 13.04%,说明矿体与中基性岩体一起经受了长期的风化剥蚀作用。按矿体形成深度在 4000~5000 m 赋矿空间计算,矿体剥蚀最强烈者已剥蚀殆尽,强烈者则在二分之一至三分之一,有 34.78%的矿体尚未 受到剥蚀。

5. 讨论与结论

5.1. 问题讨论

翟裕生先生将矿床形成后变化、保存过程称之为保矿系统[21],它包涵了矿床形成后的环境演化过程 和矿床现在的三维空间形态[25],而矿床的现在保存状态是决定人类能否开发利用的前提。在整个地球演 化过程中,构造运动是地球物质运动的一种重要表现形式,所谓沧海桑田、山岳胜势则反映了地壳升降 的历史记录。白垩纪时期在中国东部构造体制转折的大背景下[11] [26],鲁西形成羽状断裂系统、棋盘格 状断裂系统和相间分布的北西向掀斜式断陷盆地,这些盆地的共同特点是南超北断[24],靠近盆缘断裂则 形成巨厚的碎屑沉积物。随着构造作用的不断加强,控盆的边界断裂构造下切至上地幔,控制了地幔玄 武质岩浆的底辟侵位作用,中基性岩浆与碳酸盐岩的接触交代而形成铁矿。与富铁矿有关的莱芜侵入岩 形成时代为 126±1 Ma~134±2 Ma [17] [18] [27],形成于白垩纪早白垩世。韩鎏通过锆石 LA-ICP-MS 测 年得到莱芜张家洼闪长岩为 131 Ma [18],收集到的淄博金岭、济南和禹城等铁矿田的形成时代与岩体同 步,年龄值在 126±1 Ma~134±2 Ma [27],集中在 130 Ma,时代属早白垩世。

莱芜铁矿田内的铁矿床在130 Ma 形成后,其后进入了矿床保存的演化阶段,地层、构造事件的发育

保留现状则证明了铁矿床形成后持续经历的区域地壳升降构造的活动记录。张增奇等[28]在对山东省地层 单元划分研究时对泰莱盆地内地层层序进行了厘定,认为早白垩世辽西期晚期开始抬升,缺失了晚白垩 世至古新世上湖期的沉积,其沉积间断约 38 Ma,至古新世池江期开始沉积了官庄群常路组、朱家沟组 和大汶口组,之后泰莱地区地壳又开始抬升,缺失了新近世沉积。戴广凯等[19]在进行 1:5 万莱芜、范镇 等幅区调时,通过对泰莱盆地重要不整合面的识别、对重要不整合剥蚀量的计算,结合盆地的构造解释 及断裂特征及活动性分析等特征,将泰莱盆地的中新生代构造演化划分为 5 个阶段:晚侏罗世 - 早白垩 世坳陷阶段、晚白垩世 - 古新世抬升剥蚀剥蚀阶段、古近纪断陷阶段、晚渐新世挤压阶段、新近纪坳陷 阶段,但未进行抬升及剥蚀量的估算。杨恩秀等[20]在进行 1:25 万淄博市幅区调时,将泰莱盆地划分了 早白垩世沉积、晚白垩世隆升、古近纪沉积、新近世上隆和第四纪沉积阶段。总体来说,泰莱盆地划分了 早白垩世沉积、晚白垩世隆升、古近纪沉积、新近世上隆和第四纪沉积阶段。总体来说,泰莱盆地处白 垩纪以来,经历了多次抬升、沉降、再抬升到再沉降的复杂过程,反映了中、新生代地壳强烈差异性升 降的特征。而莱芜地区的铁矿在形成以后,亦与区域地壳升降一起,经受了强烈的地壳抬升作用,基本 剥蚀到了石炭 - 二叠纪层位和奥陶纪层位,各地抬升剥蚀稍有差异,但总体是在矿床形成后地壳的抬升 幅度是很大的,平均剥蚀了 4000 米左右的矿体上覆覆盖物,在古近纪古新世中期地壳又开始下沉接受沉 积,矿体才得以保存(图 3)。



Figure 4. Laiwu iron deposit changes with the crustal rise and fall and preserves the spatiotemporal evolution trajectory 图 4. 莱芜铁矿床随地壳升降发生变化、保存时空演化轨迹图

根据莱芜断陷盆地内地层沉积序列和钻孔揭露情况,盆地内早古生代地层改良较全,缺失了二叠纪阳新统中、上层位及三叠纪、侏罗纪地层。莱芜侵入体侵入时代 126 ± 1 Ma~134 ± 2 Ma,基本上也是铁矿的形成时代。在岩体侵位及铁矿形成后,缺失了白垩系至古近系古新统早期的沉积,也就是说,中生代莱芜岩体侵位后,区域上进入抬升期,导致了白垩系至古近系古新统的缺失。图 4 即是根据区域地层分布、钻孔揭露岩性而确定的矿体/岩体随着时间变化而呈现出地壳升降变化的时空演化轨迹。

从岩体侵位和矿体形成,到矿床的现在保存状态,大致经历了 5 个阶段。第一阶段是地壳持续抬升 隆起期,相当于从 130 Ma 莱芜岩体侵入,相对应的铁矿同步或稍后形成,随即进入抬升期,从 130 Ma 到 60 Ma 古近纪古新世官庄群常路组沉积期间,一直处于持续抬升阶段。第二阶段是强烈风化剥蚀阶段 期,大约在 65~57 Ma 矿体和岩体均遭受到了强烈风化剥蚀,铁矿床被剥蚀后形成残坡积砾岩型铁矿,有 的经短距离搬运后形成坡积砾岩型铁矿,并导致古近纪常路组沉积物直接覆盖于铁矿体之上(参见图 2、 图 3)。第三阶段是地壳下降沉积期,从 57~29 Ma 地壳又发生变化,开始逐渐下降,接受了古近纪官庄 群常路组、朱家沟组和大汶口组的沉积,但在莱芜铁矿田内未见到朱家沟组和大汶口组,仅在钻孔中见 到常路组。常路组岩性为:底部为复成分砾岩,砾石成分以灰岩为主,次为闪长岩、少量的磁铁矿等, 向上为砖红、紫红色泥岩、砂岩与砾岩互层,厚度不一,莱芜桑园厚 560 m 左右、颜庄厚 260 m、张家 洼最厚达 900 m,说明该期下降沉积还是较快的。第四阶段是地壳缓慢隆升期,该阶段大致从 28 Ma 始 至 2.6 Ma,地壳又开始缓慢抬升,缺失了古近纪渐新世、新近纪中、上新世和第四纪更新世早期的沉积。 第五阶段是现今的矿岩保存现状阶段,矿体保留在如今的位置。

矿床形成后的环境演化过程和矿体的保存情况,可以粗略地估算地壳在 130 Ma 至今所经历的抬升、下降、再抬升再下降的升降演化过程。从 130 Ma 到 60 Ma 该区地壳一直处于持续隆升状态,在 70 Ma 的时间内地壳隆升了 4500 m,其上升速率大约 0.064 mm/a,而在 8 Ma 的时间内矿体剥蚀了 260 m,其剥 蚀速率大约 0.033 mm/a,说明区内经历了快速隆升和缓慢剥蚀的复杂过程。

5.2. 结论

 1) 莱芜铁矿田是受早古生代碳酸盐岩地层、中生代中基性侵入岩和接触带构造三位一体控制的接触 交代矽卡岩型铁矿,其形成后矿床遭受了不同程度的风化剥蚀,可分为强剥蚀矿床、轻微剥蚀矿床和未 剥蚀矿床,铁矿类型以原生铁矿床为主,砾岩型铁矿则占比较少。

2) 根据莱芜铁矿田内矿体形成的深度与成矿母岩的侵位深度是大体一致的客观事实,结合莱芜铁矿 田成矿母岩岩石化学指数间接判断其侵入深度和剥蚀深度,依据沉积层区域厚度和钻孔揭露的残存地层 厚度估算,莱芜中基性侵入岩的侵位深度应在 4000~7000 m 范围内,其剥蚀深度应在 3000~5000 m 左右; 铁矿体形成深度略浅于岩体侵位深度,大致在 3900~5000 m 范围内,而剥蚀深度基本在 4000~5000 m。

3) 莱芜地区与矽卡岩型铁矿有关的莱芜侵入岩形成时代为126±1 Ma~134±2 Ma,莱芜铁矿田内的 铁矿床的形成年龄在130 Ma,从岩体侵位和矿体形成到铁矿床现在的保存状态,其形成后的环境演化过 程大致经历了地壳持续抬升隆起阶段、强烈风化剥蚀阶段、地壳下降沉积阶段、地壳缓慢隆升期和现今 的矿岩保存现状 5 个阶段。利用剥蚀沉积厚度进行区内地壳的隆升变化速率的估算,估算结果表明泰莱 盆地区域上升速率大约0.064 mm/a,而区域剥蚀速率大约0.033 mm/a,说明区内经历了快速隆升和较缓 慢剥蚀的复杂过程,为研究泰莱盆地及其周围区域地壳升降运动和区内铁矿床的保存提供了佐证。

致 谢

感谢郝兴中正高级工程师在成文过程中提供的方便,感谢地球科学前沿编辑部多年来对作者的热心 支持和帮助,感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议!

基金项目

全国重要矿集区找矿预测山东省齐河—禹城矿集区找矿预测(0747-1761SITCN072/19,0747-1861SITCN1 49/19)和山东省泰山学者建设工程专项联合资助。

参考文献

[1] 曾广湘, 吕昶, 徐金芳. 山东铁矿地质[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1998.

- [2] 程裕淇, 沈永和, 曹国权, 等. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 杨志. 我国东部地区砂卡岩铁矿的成岩成矿时代[J]. 冶金工业部地质研究所所报, 1982(1): 130-132.

- [4] 赵一鸣,林文蔚,毕承思.中国矽卡岩矿床[M].北京:地质出版社,1990.
- [5] 赵一鸣. 中国主要富铁矿床类型及地质特征[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 685-704.
- [6] 宗信德, 贾东亮, 刘超, 等. 山东莱芜接触交代-热液铁矿矿体形态研究[J]. 山东国土资源, 2010, 26(11): 13-18.
- [7] 宗信德, 李卫, 赵宏生, 等. 山东莱芜接触交代-热液铁矿多因素成矿及特征[J]. 地质与资源, 2011, 20(5): 370-375.
- [8] 宗信德,徐建,卢铁元,等.山东莱芜矿山矿田铁矿产出构造类型——矿体型式及大-大中型矿床赋存规律[J]. 地质找矿论丛,2010,25(3):234-234.
- [9] 宗信德, 贾东亮, 刘超, 等. 山东莱芜接触交代-热液铁矿矿体形态研究[J]. 山东国土资源, 2010, 26(11): 13-18.
- [10] 杨昌彬, 宗信德, 卢铁元, 等. 浅析莱芜接触交代-热液铁矿的双交代渗滤作用[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(增刊): 85-89.
- [11] 李洪奎, 于学峰. 山东省大地构造相研究[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 281-314.
- [12] 李洪奎, 郝兴中, 李逸凡, 等. 鲁西地区铁矿成矿规律研究[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 12-125.
- [13] 郝兴中, 王巧云. 鲁中隆起区中北部矽卡岩型铁矿成矿预测[J]. 地质学刊, 2016, 40(3): 443-449.
- [14] 郝兴中. 鲁西地区铁矿成矿规律与预测研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2014: 43-72.
- [15] 郝兴中,刘伟,臧凯,等.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, 2018, 34(7): 27-33.
- [16] 杨承海, 许文良, 杨德彬, 等. 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, 2005, 26(4): 321-325.
- [17] 杨承海, 许文良, 杨德彬, 等. 鲁西中生代高 Mg 闪长岩的成因: 年代学与岩石地球化学证据[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2006, 31(1): 81-92.
- [18] 韩鎏. 山东莱芜含矿岩体成因及其与铁矿的关系[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2014: 1-62.
- [19] 戴广凯, 王金光, 王丽娟, 等. 1:5 万莱芜市幅、范镇幅区域地质调查报告[R]. 2014: 269-274.
- [20] 杨恩秀, 王世进, 张春池, 等. 1:25 万淄博市幅区域地质调查报告[R]. 2004: 354-358.
- [21] 翟裕生. 成矿系统论[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 8-21.
- [22] 战群. 张家洼矿床控矿构造特征及找矿预测[J]. 金属矿山, 2007, 378(12): 83-85.
- [23] 施允亨, 宋世民. 山东莱芜铁矿围岩蚀变及其对成矿的影响[J]. 山东地质, 1987, 1(3): 89-102.
- [24] 叶天竺, 张智勇, 肖庆辉, 等. 成矿地质背景研究技术要求[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 160-200.
- [25] 翟裕生,邓军,彭润民.矿床变化与保存的研究内容和研究方法[J].地球科学——中国地质大学学报,2000, 25(4):340-345.
- [26] 李洪奎,杨永波,杨锋杰.山东沂沭断裂带构造演化与成矿作用[M].北京:地质出版社,2009.
- [27] 金子梁. 砂卡岩型富铁矿成因研究——以鲁西淄博和莱芜铁矿为例[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2017: 1-102.
- [28] 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.